

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Anàlisi aerodinàmica d'una pilota de futbol

MEMÒRIA

Autor: Alex Palacios Corral
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Gener 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

De quina manera es poden combinar ciència i esport per acabar donant un bon resultat?

Hi ha algun tipus de fórmula matemàtica que doni amb la tecla adequada i permeti automatitzar la pràctica esportiva?

De ben segur que, davant d'una pregunta tan general, la resposta és clara: depèn de l'esport. Si es consideren els escacs com a un esport, es pot estar estona debatent sobre si existeixen certs algorismes que ajudin a millorar el joc, si bé és cert que, al finalitzar el primer torn de cada jugador, ja existeixen 400 possibilitats de distribució de fitxes (20 opcions per a cadascú).

El treball va més encaminat a descobrir mecanismes en esports dinàmics on, per exemple, hi hagi una pilota que corri i que sigui sotmesa a agents externs com poden ser el fregament de la gespa, de la terra, del parquet, el vent, la temperatura, la humitat, la pluja.... La pregunta és si seria possible analitzar aquests factors per tal d'aconseguir saber de quina manera poden ser utilitzats i donar la volta a la situació, per a que acabin així afavorint una millor realització del joc.

Aprofundint una mica més encara, aquest treball se centrarà en l'afectació de tot l'esmentat anteriorment sobre una pilota i una superfície futbolística.

Amb la finalitat d'aconseguir-ho, mitjançant l'estudi de la mecànica de fluids, i realitzant les pertinents simulacions amb el programa ANSYS Fluent, es tractarà d'extreure una solució al problema plantejat, que serveixi com a ajuda a tota la gent que practiqui el futbol. Tot i així, és remarcable que la millora seria efectiva si es tracta d'una pràctica professional o semi-professional, donat l'augment de la complexitat que ja de per si involucra una acció com una passada o un xut.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	4
1. PREFACI	9
1.1. Origen del projecte.....	9
1.2. Motivació	9
2. INTRODUCCIÓ	11
2.1. Objectius del projecte.....	11
2.2. Abast del projecte	11
3. EVOLUCIÓ DEL FUTBOL	12
4. FONAMENTS TEÒRICS	13
4.1. Els fluids	13
4.1.1. Flux ideal	13
4.1.2. Flux bidimensional.....	15
4.2. Flux potencial	16
4.2.1. Flux paral·lel uniforme	18
4.2.2. Fonts i sumideros	19
4.2.3. Dipols.....	20
4.3. Flux potencial axilsimètric.....	23
4.4. Bernoulli	27
4.5. Efecte Magnus	28
4.5.1. Introducció a l'efecte Magnus	28
4.5.2. Altres aplicacions.....	30
4.6. Capa límit	31
4.7. Forces sobre els cossos.....	32
5. SIMULACIONS	36
5.1. Preparació	36
5.2. Resultats.....	44
6. CONCLUSIONS	60
7. ANÀLISI ECONÒMIC	62
7.1. Discretització del projecte	62

7.2. Diagrama de Gantt.....	65
8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL.....	66
BIBLIOGRAFIA	67
Referències bibliogràfiques.....	67
Bibliografia complementària.....	68

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Des de fa temps, es discuteix sobre la possibilitat d'involucrar qüestions científiques a l'hora de realitzar pràctiques esportives. I és que sempre s'ha pensat que una activitat tan quotidiana per a la majoria de gent, sobretot jove, hauria de poder-se modelar gràcies a l'avanç de la ciència al llarg dels anys.

Tothom ha pensat alguna vegada quin efecte és el més adequat per donar-li a la pilota en cada moment, fins i tot ha intentat jugar amb això ell sol. Depenent de quin punt sigui a on se li aplica la força el gir serà d'una manera o d'una altra.

En aquest projecte se centraran els esforços en un esport en concret, el futbol. Es tractarà d'aconseguir ajudar-se dels factors externs que actuen sobre la pilota per tal d'acabar-ne traient avantatge.

1.2. Motivació

Avui en dia el futbol, anomenat “esport rei”, és l'esport que més gent practica. Segons un estudi realitzat per la FIFA (Federació Internacional d'Associació de Futbol) el nombre de persones federades arreu del món s'eleva, aproximadament, als 265 milions.

Tots aquests esportistes estarien encantats de saber com han de colpejar la pilota en funció de les condicions climatològiques, o de l'alçada de la gespa.

Hi ha una sèrie de dibuixos animats coneguda arreu del món, “The Simpsons”, on una de les protagonistes esdevé entrenadora de l'equip de beisbol de la ciutat. Ella, la Lisa, no té coneixements sobre aquest esport, pel que demana ajuda als seus companys d'universitat i, a arrel d'una gran base de dades d'estadístiques, intenta explicar als seus jugadors què han de fer en cada moment i en cada posició. El capítol deixa sense resoldre l'enigma de si hauria estat millor i si haurien guanyat el campionat gràcies al mètode emprat per l'entrenadora, ja que el seu jugador estrella decideix no fer cas i deixar-ho tot en mans del seu talent ja que, segons ell, “així es viu més l'emoció de l'esport”. Això sí, deixen la porta oberta a que, qui vulgui, pugui realitzar investigacions científiques per tal d'extreure'n conclusions.

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és determinar quins coneixements de mecànica de fluids es poden aplicar a l'hora d'analitzar el comportament d'una pilota de futbol, com ara la trajectòria, acceleració, velocitat, deformació.

Es tractarà d'aconseguir dades numèriques que permetin extreure conclusions sobre les afectacions a una pilota de futbol

2.2. Abast del projecte

Primerament es realitzarà un estudi sobre de quina manera pot actuar la ciència a un esport com el futbol.

Més tard, es farà un repàs sobre qüestions fonamentals de la mecànica de fluids i que s'utilitzaran per a fer un primer anàlisi de la situació, i veure com es pot veure afectat l'objecte d'estudi.

Per acabar, es duran a terme diverses simulacions, per tal de fer un estudi més detallat i definitiu i, ajudat de les primeres conclusions, acabar d'elaborar una postura en front al cas plantejat.

3. Evolució del futbol

El futbol, com gairebé tots els esports, ha anat evolucionant al llarg dels anys.

Des dels seus inicis, es tractava de fer entrar la pilota a la porteria rival per tal de sumar gol. Tot es reduïa a anar el més ràpid possible fins la porteria rival, i així aconseguir fer el gol abans. Van anar passant els anys, i es va pensar que potser la manera més ràpida no era la més bona per tal d'aconseguir l'objectiu. Es va començar a automatitzar tot una mica més. Van cobrar força els entrenadors; després de meditar i pensar quina era l'opció correcta, després de trencar-se el cap per veure quines havien de ser les distàncies adequades, la força amb la que es xutava la pilota o quin moviment havia de fer cada jugador, ho transmetien a la seva plantilla.

A dia d'avui, tot està molt més automatitzat i informatitzat. A diferència d'abans, on gairebé l'únic que importava era el talent individual, ara cobren molta més importància els números. De cara a preparar un partit, un entrenador es fixa en estadístiques de partits anteriors, distàncies recorregudes, nombre de passades errades o tants per cent de possessió de cada equip.

A més a més, es comencen a desenvolupar teories clandestines sobre quina és la millor manera de xutar una falta, un corner o un penal. I és que, sense voler-ho, mentre s'està jugant, s'és envoltat de mil idees semblants a les que poden aparèixer en entrar a una universitat d'enginyeria: la trajectòria descrita per la pilota; la potència a la que és sotmesa; quina és la força causada per l'impacte; a quina velocitat màxima arriba; a quin fregament és sotmesa...

4. Fonaments teòrics

4.1. Els fluids

Per tal de caracteritzar de manera general les propietats tèrmiques dels cossos, s'utilitza el concepte d'estat d'agregació (líquid, sòlid, gas, plasma). Per a diferenciar-los entre ells, es tracta d'un afer quantitatiu: la diferència de densitat, és a dir la intensitat de la interacció de les molècules. No es parla d'un concepte qualitatiu, donat que el canvi de, per exemple, gas a líquid o a l'inrevés, és considerat continu; no es distingeix un punt on deixa de pertànyer a un estat i canvia a l'altre.

La classificació de fluids depèn fonamentalment de l'estat i no del material en si. El que defineix al fluid, per tant, és el seu comportament, no la seva composició. Un dels trets més significatius és com reaccionen a l'aplicació d'una força. Es pot definir com “ substància que es deforma continuadament, s'escorre, quan és sotmesa a un esforç de tall o tangencial”. Es conclou que un fluid en repòs no suporta cap esforç de tall.

4.1.1. Flux ideal

El volum d'un líquid es considera com un medi continu format, en repòs, per làmines superposades que poden lliscar unes sobre les altres. Si es desplaça una, les adjacents són arrossegades. Existeixen llavors forces de fregament internes anomenats esforços tangencials. El líquid es considera així viscos

Un flux ideal ha de complir les següents condicions: ser de règim estable, irrotacional, incompressible i no viscos.

- Estacionari

Les propietats no canvien amb el temps; poden canviar d'un punt a un altre, però es mantenen estables en determinat punt durant tot el procés.

$$\frac{\delta P}{dt} = 0 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

P: Qualsevol propietat del fluid

- Irrotacional

Si un fluid és sotmès a una corrent circular, però les seves partícules no giren al voltant de l'eix que passa pel centre de masses, es considera un fluid irrotacional.

$$\nabla \times \mathbf{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} + \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

F: Velocitat del fluid

- Incompressible

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (\text{Eq. 4.3})$$

ρ : densitat del fluid

Un fluid es considera incompressible si, en comprimir el seu flux, la densitat roman constant. S'ajusta amb el nombre adimensional de Mach, i es considera incompressible si aquest és més petit que 0,3.

- No viscos

No compleix totes les condicions anteriorment esmentades sobre un fluid viscos.

4.1.2. Flux bidimensional

$$\mathbf{v} = u(x, y, t)\mathbf{i} + v(x, y, t)\mathbf{j} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

S'entén que un flux és bidimensional si és un flux pla (la component perpendicular de la seva velocitat és nul·la). Varia només en funció de dues direccions i del temps.

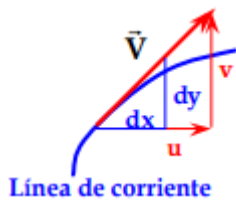
Si es parla d'un fluid bidimensional i incompressible, l'equació es pot reduir fins a la següent forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{Eq. 4.5})$$

4.2. Flux potencial

Les línies de corrent es defineixen com tangents al vector velocitat. De la proporció de triangles resulta la següent equació:

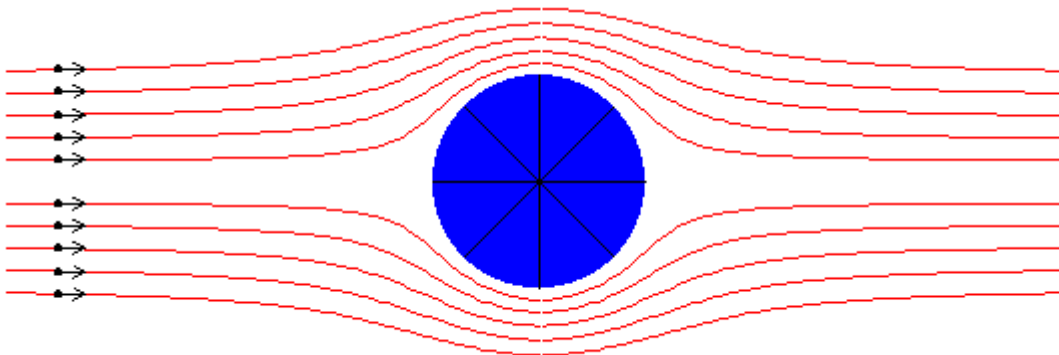
$$\frac{u}{v} = \frac{dx}{dy} \Rightarrow udy - vdx = 0 \quad (\text{Eq. 4.6})$$



IL·LUSTRACIÓ 1. LÍNIES DE CORRENT [11]

S'estudiarà el moviment d'un sòlid circular immers dins d'un fluid.

Com és el cas d'un cos simètric, les línies de corrent es reparteixen simètricament. La velocitat als punts dels extrems del diàmetre horitzontal és nul·la, de la mateixa manera que, als extrems del seu diàmetre vertical, és màxima.



IL·LUSTRACIÓ 2. LÍNIES DE CORRENT AL VOLTANT D'UN COS SIMÈTRIC [3]

Es defineix una funció ψ . S'anomena funció de corrent. Si la funció és constant, llavors $d\psi = 0$. Per tant:

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0 \Rightarrow u = \frac{\partial \psi}{\partial y}; v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Anàlogament, la funció de potencial s'estructura de la següent manera:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Per tal de determinar el camp de velocitats de qualsevol flux s'ha de resoldre la determinació de Laplace per a Ψ amb les corresponents condicions de contorn. Si Ψ és coneguda, es determina el camp de velocitats per simple derivació. Si es desitja conèixer el camp de velocitats al voltant d'un cos submergit en un flux tal que $V_\infty = (U, 0)$, les condicions de contorn seran:

$$x \rightarrow \pm\infty, \forall y; u \rightarrow U, v = 0$$

És a dir:

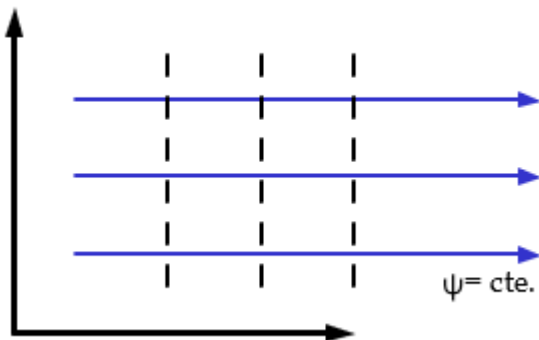
$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \rightarrow U; \frac{\partial \psi}{\partial x} \rightarrow 0 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

4.2.1. Flux paral·lel uniforme

Es pressuposa un flux unidireccional en la direcció de les x , com el descrit anteriorment. Mitjançant una integració, s'aconsegueixen les següents funcions de potencial i de corrent, respectivament:

$$\begin{aligned}\phi &= Ux + C_1 \\ \psi &= Uy + C_2\end{aligned}\tag{Eq. 4.10}$$

Les constants C es poden ignorar, ja que no afectaran al càlcul de les velocitats ni de les pressions. A la següent figura es mostren graficades les funcions de corrent esmentades, on l'eix d'abscisses representa les " x " i el d'ordenades les " y ".



IL·LUSTRACIÓ 3. FUNCIONS DE CORRENT [11]

Es pot generalitzar l'equació per a línies que tenen un cert angle d'inclinació:

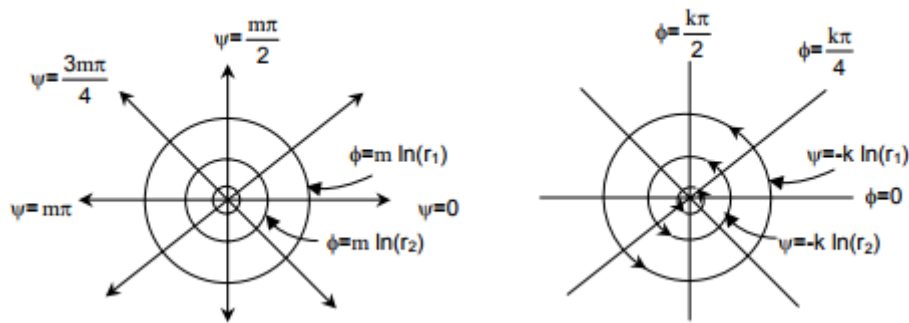
$$\begin{aligned}\phi &= U(x\cos\alpha + y\sin\alpha) \\ \psi &= U(y\cos\alpha - x\sin\alpha)\end{aligned}\tag{Eq. 4.11}$$

4.2.2. Fonts i sumideros

Es suposa ara un tub prim situat a l'eix z i emet transversalment un cabal al llarg de la seva longitud. Mirant al llarg de l'eix z , es veuria un flux radial tal com es mostra esquemàticament a la següent figura. En flux estacionari, la quantitat de flux que travessa una superfície cilíndrica, de radi r i longitud b , és constant.

$$Q = v_r 2\pi r b = \text{const} = 2\pi b m,$$

Sent v_r la relació m/r , on "m" és una constant coneguda com a intensitat de la font o del sumidero. Si m és positiu es té una línia de font bidimensional i, si m és negatiu, un sumidero bidimensional. En el cas que es mostrarà a la següent figura, la m considerada és positiva, per tant les línies de corrent de les fonts apunten cap a fora.



IL·LUSTRACIÓ 4. FLUX D'UNA FONT. LÍNIES DE CORRENT I LÍNIES EQUIPOTENCIALS [7]

Per treballar d'una manera més senzilla, es poden traduir les equacions a forma polar:

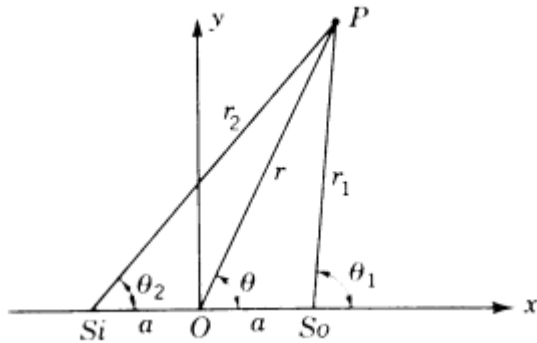
$$\begin{aligned} v_r &= \frac{m}{r} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = \frac{\partial \phi}{\partial r} \\ v_\theta &= 0 = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

i, integrant, obtindríem:

$$\begin{aligned} \phi &= m \ln(r) \\ \psi &= m \theta \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

4.2.3. Dipols

Un dipol es defineix com el resultat de la suma d'una font i un sumidero d'igual intensitat, quan s'aproximen l'un a l'altre, de tal forma que el producte de les seves intensitats i la distància entre ells és la constant $2\pi\lambda$. A λ se l'anomena "intensitat del dipol".



IL·LUSTRACIÓ 5. DIPOL BIDIMENSIONAL [7]

Si una font es troba a $(a,0)$ i un sumidero d'igual intensitat a $(-a,0)$, el potencial de velocitats per a ambdós, en un punt P és:

$$\phi = -m \ln r_1 + m \ln r_2 \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Amb r_1 i r_2 les distàncies des de la font i el sumidero al punt P.

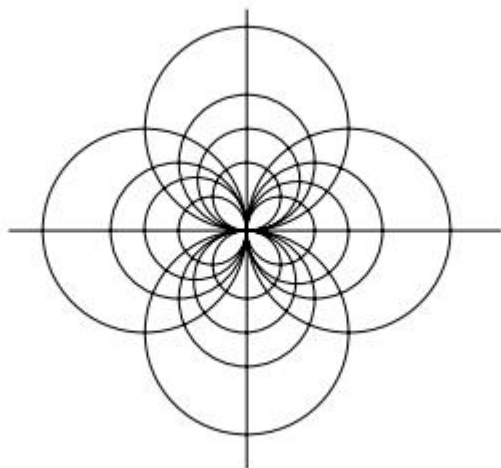
Si es vol expressar el potencial de velocitats per a un dipol bidimensional en coordenades polars, s'obté la següent forma (origen a l'eix a la direcció +x):

$$\phi = \frac{\lambda \cos \theta}{r} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Per tal d'obtenir la funció de corrent, s'empren coordenades cilíndriques:

$$\psi = -\frac{\lambda \sin \theta}{r} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Les línies de corrent constant són cercles tangents a l'eix x i passen per l'origen; les línies equipotencials són cercles que passen per l'origen i són tangents a l'eix y. Al (0,0) la velocitat és infinita i es considera un punt singular.



IL·LUSTRACIÓ 6. LÍNIES EQUIPOTENCIALS I DE CORRENT D'UN DIPOL BIDIMENSIONAL [7]

Es pot demostrar el perquè d'aquestes corbes transformant les dues equacions a forma cartesiana:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\lambda x}{x^2 + y^2} \\ \psi &= -\frac{\lambda y}{x^2 + y^2}\end{aligned}\tag{Eq. 4.17}$$

4.3. Flux potencial axilsimètric

En el flux potencial axilsimètric es pot utilitzar la mateixa tècnica de superposició que al cas del flux pla.

Treballant en coordenades esfèriques, un corrent uniforme U_∞ a la direcció x té les components:

$$\begin{aligned}V_r &= U_\infty \cos \theta \\v_\theta &= -U_\infty \sin \theta\end{aligned}\tag{Eq. 4.18}$$

Corrent uniforme:

$$\begin{aligned}\psi &= -\frac{1}{2}U_\infty r^2 \sin^2 \theta \\ \phi &= U_\infty r \cos \theta\end{aligned}\tag{Eq. 4.19}$$

Considerem un flux volumètric Q provinent d'una font puntual. El flux serà radial i la velocitat a una distància r serà Q dividit per l'àrea $4\pi r^2$ de l'esfera.

Tenint en compte els resultats anteriors, es té:

$$\begin{aligned}\psi_{dipol} &= \frac{\lambda \sin^2 \theta}{r} \\ \phi_{dipol} &= \frac{\lambda \cos^2 \theta}{r}\end{aligned}\tag{Eq. 4.20}$$

La funció de corrent d'un corrent uniforme més una font puntual a l'origen és la següent:

$$\psi = -\frac{1}{2}U_{\infty}r^2 \sin^2 \theta + m \cos \theta\tag{Eq. 4.21}$$

Obtenint les components de velocitat:

$$\begin{aligned}v_r &= U_{\infty} \cos \theta + \frac{m}{r^2} \\ v_{\theta} &= -U_{\infty} \sin \theta\end{aligned}\tag{Eq. 4.22}$$

I aquí s'arribarà al punt interessant. Quan es combinen un corrent uniforme més un dipol puntual, s'obté:

$$\psi = -\frac{1}{2}U_{\infty}r^2 \sin^2 \theta + \frac{\lambda}{r} \sin^2 \theta\tag{Eq. 4.23}$$

Examinant aquesta relació, es pot veure que la superfície de corrent $\psi=0$ correspon a una esfera de radi:

$$r = a = \left(\frac{2\lambda}{U_\infty}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

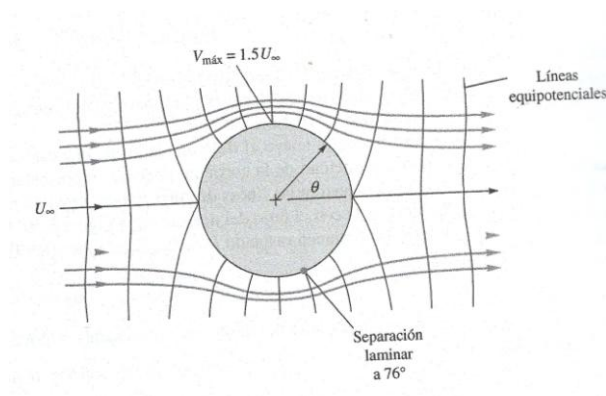
Aquest flux és anàleg al que envolta a un cilindre format per la combinació d'un corrent uniforme i un dipol bidimensional. S'anomena $\lambda = \frac{1}{2} U_\infty a^3$, i es reescriu l'anterior equació per tenir la forma:

$$\frac{\psi}{\frac{1}{2} U_\infty a^2} = -\sin^2 \theta \left(\frac{r^2}{a^2} - \frac{a}{r} \right) \quad (\text{Eq. 4.25})$$

S'obtenen les següents línies de corrent:

$$v_r = U_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{a^3}{r^3} \right)$$

$$v_\theta = -\frac{1}{2} U_\infty \sin \theta \left(2 + \frac{a^3}{r^3} \right) \quad (\text{Eq. 4.26})$$



IL·LUSTRACIÓ 7. LÍNIES DE CORRENT I EQUIPOTENCIALS PER A UN FLUX AL VOLTANT D'UNA ESFERA [10]

La velocitat radial s'anul·la a la superfície de l'esfera $r = a$. Hi ha un punt d'estancament a la part anterior (a, π) i un altre a la part posterior $(a, 0)$ de l'esfera. La velocitat màxima es dona en els punts $(a, \pm \frac{1}{2} \pi)$, on $v_r=0$ i $v_\theta=\pm 1,5U_\infty$.

La distribució de velocitat a la superfície és:

$$V_s = -v_\theta|_{r=a} = \frac{2}{3} U_\infty \sin \theta \quad (\text{Eq. 4.27})$$

4.4. Bernoulli

L'equació de Bernoulli descriu el comportament d'un fluid sota condicions variants. La seva forma, si parlem d'un fluid ideal, bidimensional i sense frec, és la següent:

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = cte \quad (\text{Eq. 4.28})$$

Entenent les variables com:

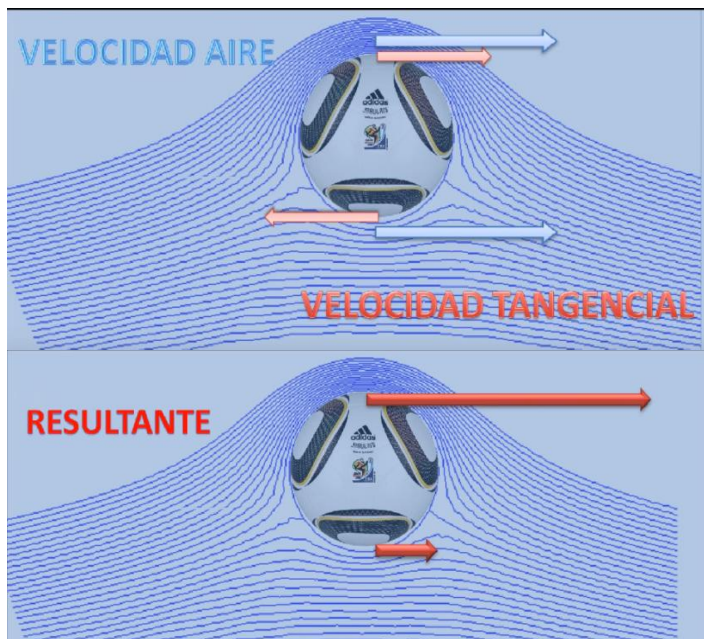
- v : velocitat del fluid en un determinat punt de la línia de corrent
- g : acceleració gravitatòria
- p : pressió del fluid al punt d'estudi
- z : alçada al punt d'estudi
- ρ : densitat del fluid

Es tracta d'una equació molt utilitzada en tota la mecànica de fluids, i que podrà ser de gran utilitat més endavant

4.5. Efecte Magnus

4.5.1. Introducció a l'efecte Magnus

Imaginem-nos un cos on el seu tall transversal és una circumferència, girant en sentit horari. Suposem també un flux laminar i constant. Degut a la viscositat, els elements del fluid en contacte amb la superfície límit són arrossegats pel moviment de gir del cilindre. Tal i com es mostra a la següent figura, tot calculant les forces resultants als punts més alt i més baix de l'objecte d'estudi, podem concloure que la velocitat augmenta en el primer cas, i disminueix en el segon.

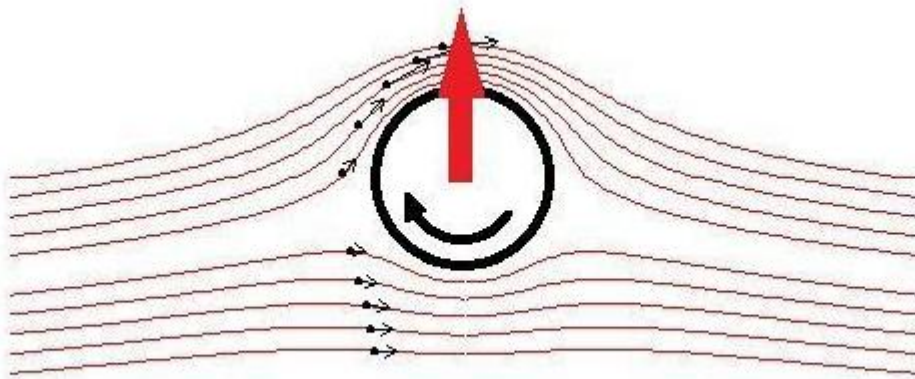


IL·LUSTRACIÓ 8. DISTRIBUCIÓ VELOCITATS EN UNA PILOTA [3]

Gràcies a l'equació de Bernoulli esmentada en el punt anterior, som capaços d'esbrinar que la pressió en els punts de més alçada serà menor que en els punts de menys alçada. Es crea una força, anomenada força de sustentació, que tendeix a desplaçar l'objecta perpendicularment a les línies de corrent.

Degut a la diferència de pressions, apareix una força. Aquesta serà perpendicular al fluid, i anirà de la part inferior a la part superior, apuntant cap a pressions menors. Si imaginem els sentits de gir i de corrent del fluid descrits anteriorment, es poden aconseguir trajectòries sorprenents donant-li certa rotació a determinats objectes.

Justament amb aquest anomenat efecte Magnus és amb el que juguen, la gran majoria d'ells sense saber-ho, els futbolistes que intenten aplicar cert efecte a una pilota de futbol. Els grans amants d'aquest esport recordaran un gol de falta directa del brasiler Roberto Carlos contra França, el 1997. Tot i la tanca defensiva que havia col·locat el porter francès, el xut es desvia de la trajectòria tradicionalment descrita, donant la sensació que la pilota sortirà fora per, posteriorment, tornar a entrar i introduir-se dins la porteria. Segurament si se li pregunta al propi jugador què és l'efecte Magnus no sabrà contestar, tot i així va ser una de les seves millors ajudes durant la carrera que va completar com a jugador professional de futbol. Justament aquest gol és batejat com "el gol que va desafiar la ciència", si bé és cert que és justament tot el contrari, va anar fermament de la mà de la ciència.



IL·LUSTRACIÓ 9. EFECTE MAGNUS [3]

4.5.2. Altres aplicacions

Actualment, existeix un projecte anomenat Vortex que, de forma resumida, consistiria en un molí sense pales. La idea va començar del que al principi era un problema: degut a l'acció d'un fluid uniforme sobre una estructura cilíndrica, es creen remolins de moviment espiral cíclic que fan que es trontolli tot oscil·lant. D'alguna manera es va pensar poder optimitzar aquest problema inicial per tal d'acabar traient-ne profit, i es van organitzar unes estructures cilíndriques en forma de con per acabar captant l'energia cinètica.

Una cosa semblant és la que es pot construir en els vaixells, i així aprofitar-se de l'efecte Magnus. La preparació de cilindres adjunts a l'estructura del vaixell que girin amb certa orientació fan que, juntament amb l'acció del vent, es creï una força que ajudi a desplaçar el vaixell en la direcció adequada.



IL·LUSTRACIÓ 10. AEROGENERADORS SENSE PALES [4]

4.6. Capa límit

La teoria de la capa límit va ser introduïda per Prandtl; aquesta teoria estableix que, per un fluid en moviment, totes les pèrdues per fricció tenen lloc a una prima capa adjacent al contorn del sòlid (anomenada capa límit) i que el flux exterior a aquesta capa es pot considerar sense viscositat. A un flux amb un alt nombre de Reynolds, els efectes de la viscositat del fluid i la rotació es confinen a una regió relativament prima a prop de les superfícies sòlides o de les línies de discontinuïtat, com les esteles. Com la capa límit és prima es poden introduir certes simplificacions a les equacions del moviment; tot i així és necessari retenir els termes d'esforç (viscos), així com els inercials (acceleració). Els termes de pressió poden estar presents o no, depenent de la naturalesa del flux fora de la capa límit. Com la vorticitat del fluid de la capa límit no és zero, no existeix funció del potencial de velocitats pel flux de la capa límit

La capa límit té les següents característiques:

- És prima ($\delta \ll x$)
- L'espessor de la capa límit augmenta en direcció corrent avall i sempre el quocient δ/x segueix sent petit.
- El perfil de velocitat a la capa límit satisfà la condició de no lliscament a la paret, i emergeix suaument fins a la velocitat de corrent lliure al límit de la capa.
- Existeix un esforç tallant a la paret
- Les línies de corrent de flux a la capa límit són aproximadament paral·leles a la superfície; vol dir que la velocitat paral·lela a la superfície és molt més gran que la normal.

4.7. Forces sobre els cossos

Quan un cos es troba submergit a qualsevol fluid, líquid o gasós, es generen forces sobre aquest, per conseqüència del moviment relatiu entre el cos i el fluid. Aquestes forces s'anomenen resistència i sustentació. La força de resistència està composta per una resistència de forma o de pressió F_P i per la resistència de superfície o resistència de fricció F_F . La resistència de forma depèn de la geometria del cos. Es calcula com la suma per integració de totes les components de les forces de pressió en la direcció del moviment que actuen sobre la superfície del cos. L'equació és la següent:

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (\text{Eq. 4.29})$$

on:

C_p : Paràmetre que depèn de la geometria del cos

ρ : Densitat del fluid

V: Velocitat del fluid

A: Àrea de referència del cos

Anàlogament la resistència de la fricció del cos és igual a la suma per integració de les components de l'esforç tallant al llarg de la superfície en la direcció del moviment.

$$F_F = C_F \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (\text{Eq. 4.30})$$

on:

C_F : Valor que depèn, entre d'altres, de la viscositat

ρ : Densitat del fluid

V: Velocitat del fluid

L: Longitud de la superfície paral·lela al flux

B: Amplada transversal

La resistència total està originada per la resistència superficial i la resistència de forma, deguda a la pressió. No obstant, molt rarament es presenten ambdós efectes simultàniament amb el mateix ordre de magnitud. En el cas dels objectes que no pateixen una sustentació apreciable, la resistència de perfil o superficial és sinònima de resistència total:

Objeto	Resist superficial	Resist de forma
Esferas	Despreciable	Apreciable
Cilindro (eje perpendicular)	Despreciable	Apreciable
Discos y placas delgadas (perpendicular a la velocidad)	CERO	Apreciable
Placas delgadas (paralelas a la velocidad)	Apreciable	Despreciable o nula
Objetos fluido dinámicos	Apreciable	Pequeña o despreciable

IL·LUSTRACIÓ 11. TAULA DE RESISTÈNCIA SEGONS GEOMETRIA [12]

La sustentació és l'altre component de la força que es genera perpendicular al moviment relatiu entre el fluid i el cos. L'exemple més elemental emprat per explicar la força de sustentació és l'ala d'un avió. S'explica que la velocitat de l'aire sobre la part superior de l'ala és més gran que la velocitat mitjana. En aplicar Bernoulli s'obté que la pressió és menor a la part superior i menor a la part inferior; donant com a resultat una sustentació neta cap a dalt., que permet mantenir a dalt l'ala.

Aquesta diferència de velocitats a la part inferior i superior de l'ala indueix un fenomen anomenat circulació, quan l'ala es mou respecte el fluid. Aquesta magnitud depèn de la forma de l'ala, la seva velocitat i orientació respecte al camp de fluid.

$$F_L = C_L \rho \frac{V^2}{2} A \quad (\text{Eq. 4.31})$$

on:

C_L : Coeficient que depèn de la geometria

ρ : Densitat del fluid

V: Velocitat del fluid

A: Àrea característica, normalment la projecció del cos sobre un pla perpendicular al moviment relatiu al fluid

En el disseny de cossos de sustentació com hidroales, ales o àleps, l'objectiu és crear una força gran, perpendicular al flux de corrent lliure, minimitzant alhora l'arrossegament

Els càlculs de l'arrossegament i la sustentació a les equacions mostrades anteriorment l'àrea es defineix com la longitud de la corda multiplicada per la longitud de l'ala (àrea projectada màxima de l'ala). S'ha adoptat aquest conveni degut a que la secció transversal de l'ala canvia amb l'angle d'atac, tant en la direcció del flux com en els angles normals a aquesta. L'angle d'atac α és l'angle entre la corda de la secció de superfície i el vector velocitat del corrent lliure.

Per a petits angles d'atac la capa límit s'adhereix a l'ala i, tot i que hi ha un gradient advers de pressió a les superfícies posteriors, existeix poca separació. La falta de simetria produeix una sustentació a un angle d'atac de 0° . A mesura que l'angle s'incrementa, el gradient advers a la superfície es fa més fort i el punt de separació es mou endavant. A aproximadament 20° , depenent del disseny de l'ala, s'assoleix la sustentació màxima. Increments addicionals e angles d'atac causen un decreixement súbdit en el coeficient de sustentació i un increment del coeficient d'arrossegament. Aquesta condició es coneix com a pèrdua.

Es disposen diverses tècniques amb la finalitat de millorar les característiques d'arrossegament i sustentació de les ales per a propòsits especials tals com l'enlairament i l'aterratge. Aquestes generalment inclouen variacions a la secció de l'ala mitjançant l'ús d'alerons o mètodes de control de la capa límit, a partir de l'adició de ranures. Superfícies en moviment que influeixen sobre la capa límit i els punts de separació en cossos també apareixen en més d'una situació física comú. Les esferes que giren juguen un paper molt

important en molts esdeveniments esportius, com en el cas que ens pertoca.

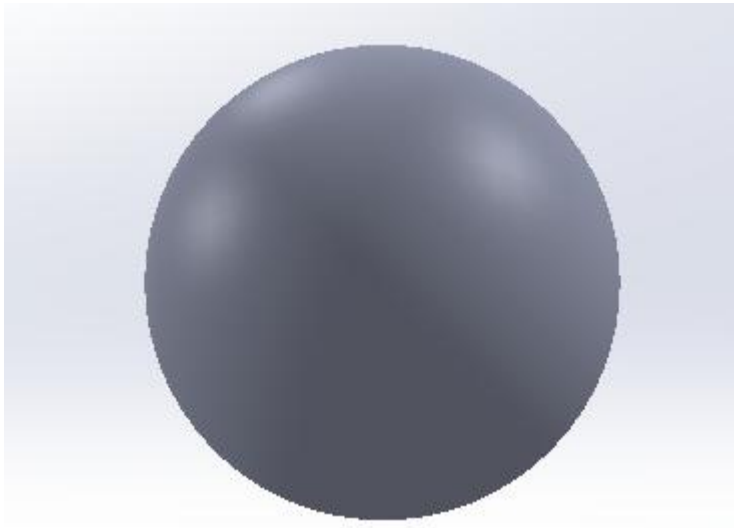
La figura mostra les velocitats desenvolupades a la capa límit d'un cos que gira dins d'un fluid en repòs. Si això se li superposa a un fluid en moviment, es desenvolupa la condició mostrada, la qual senyala un canvi en els punts de separació del cos, amb una estela col·locada asimètricament. Es crea una força de sustentació a la direcció mostrada degut a que la pressió es redueix a la superfície superior i s'incrementa a la superfície inferior.

5. Simulacions

5.1. Preparació

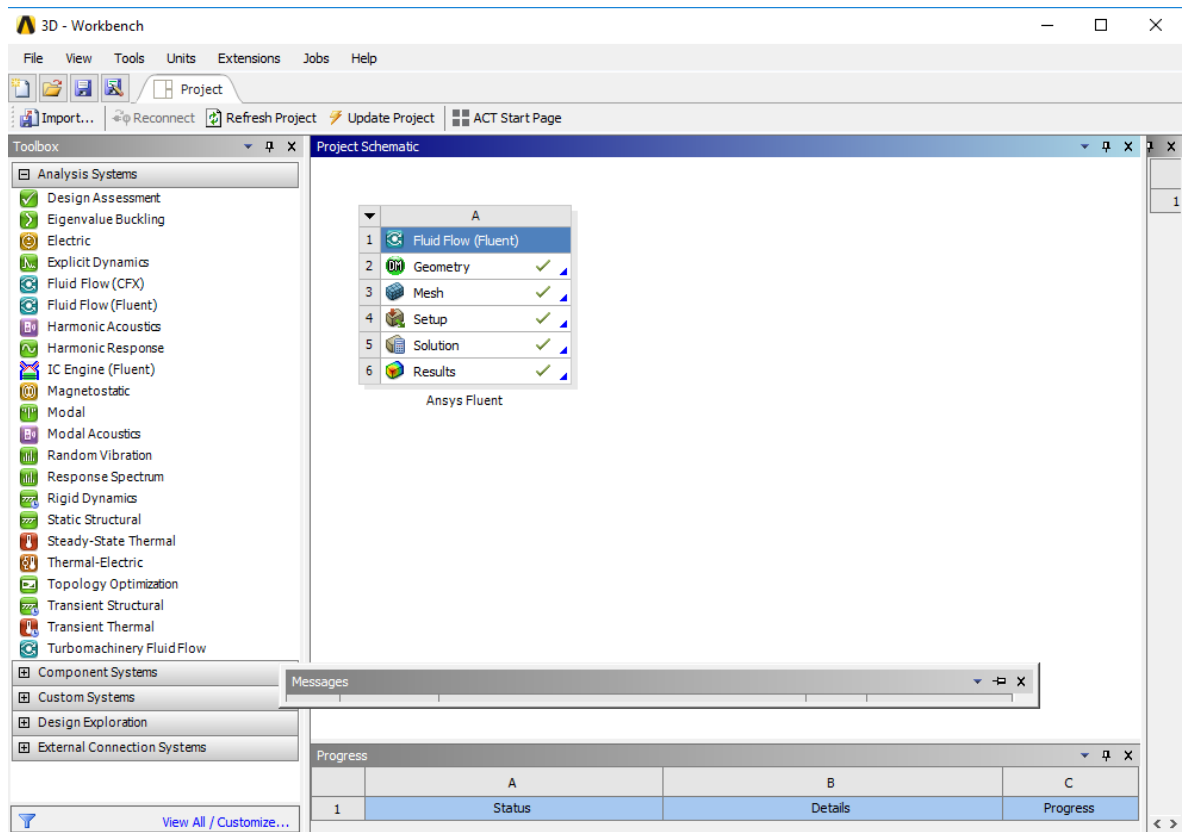
Tot seguit i, per començar a extreure conclusions, es procedirà a la realització de les simulacions. Mitjançant el programa Fluent d'ANSYS, aconseguirem una primera aproximació de l'actuació dels conceptes importants esmentats en l'anterior punt.

En primer lloc, s'ha creat un dibuix amb el programa SolidWorks, consistent en una esfera de radi 11 cm.



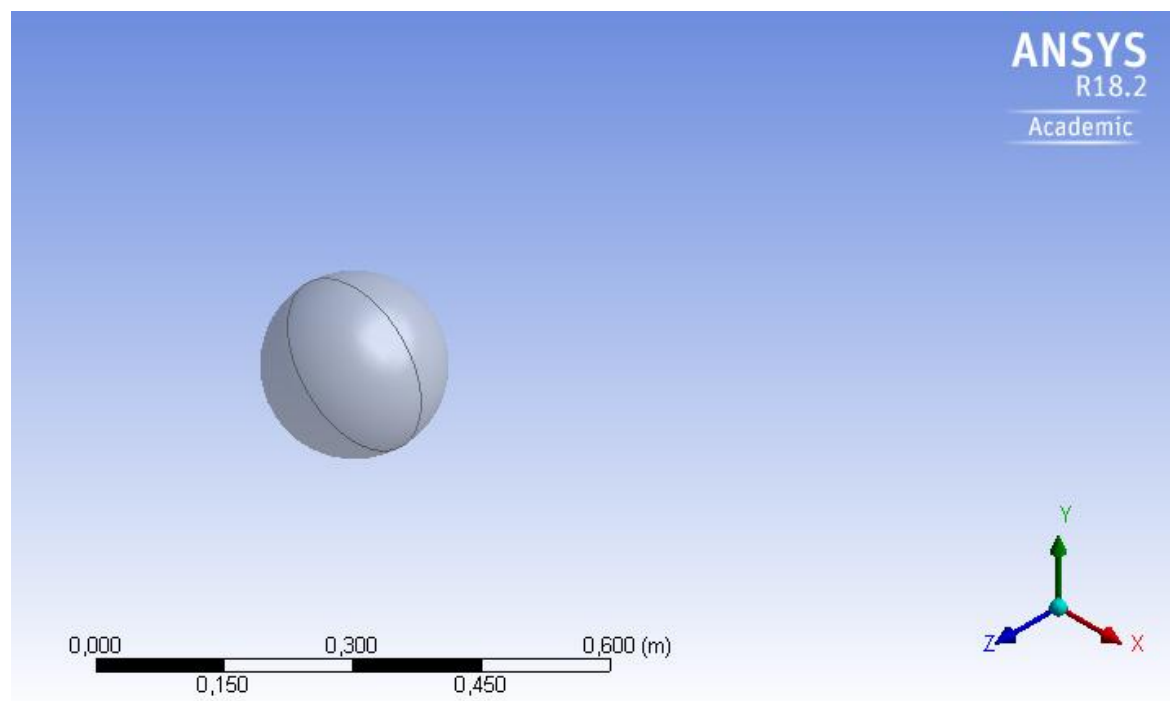
IL·LUSTRACIÓ 12. PILOTA CREADA AL SOLIDWORKS

La primera part serà comuna a totes les simulacions. En primer lloc, es defineix el tipus de sistema que es voldrà emprar, a la pantalla principal del Ansys. En aquest cas, se seleccionarà la vessant Fluid Flow (Fluent), i s'anomenarà com s'escaigui.



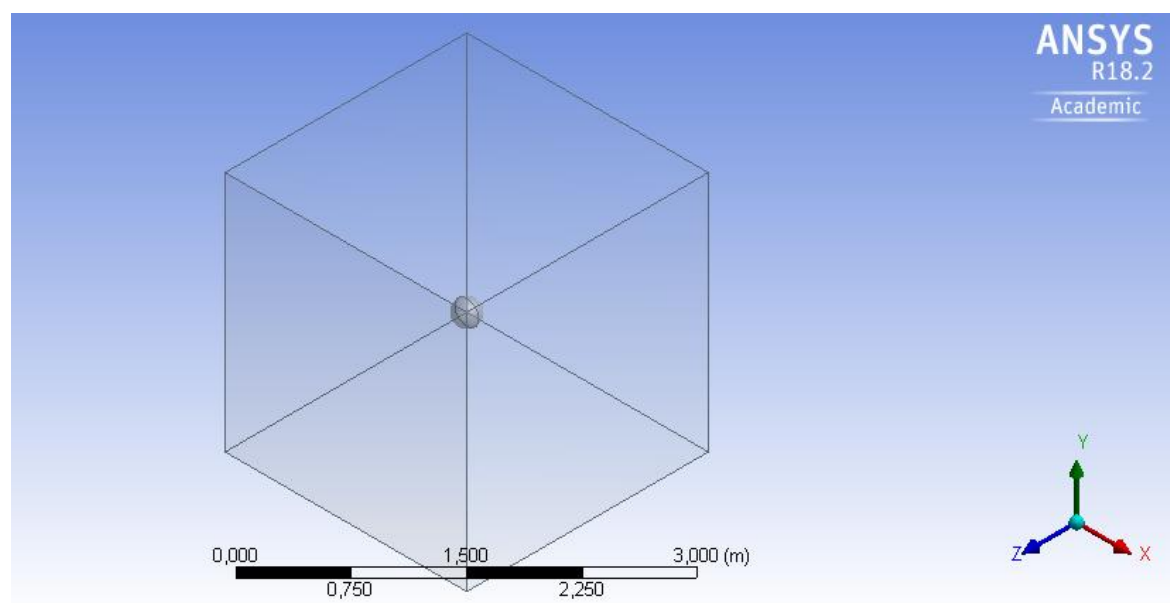
IL·LUSTRACIÓ 13. PANTALLA PRINCIPAL ANSYS FLUENT

Seguidament es procedirà a importar la geometria, en aquest cas, la d'una pilota.



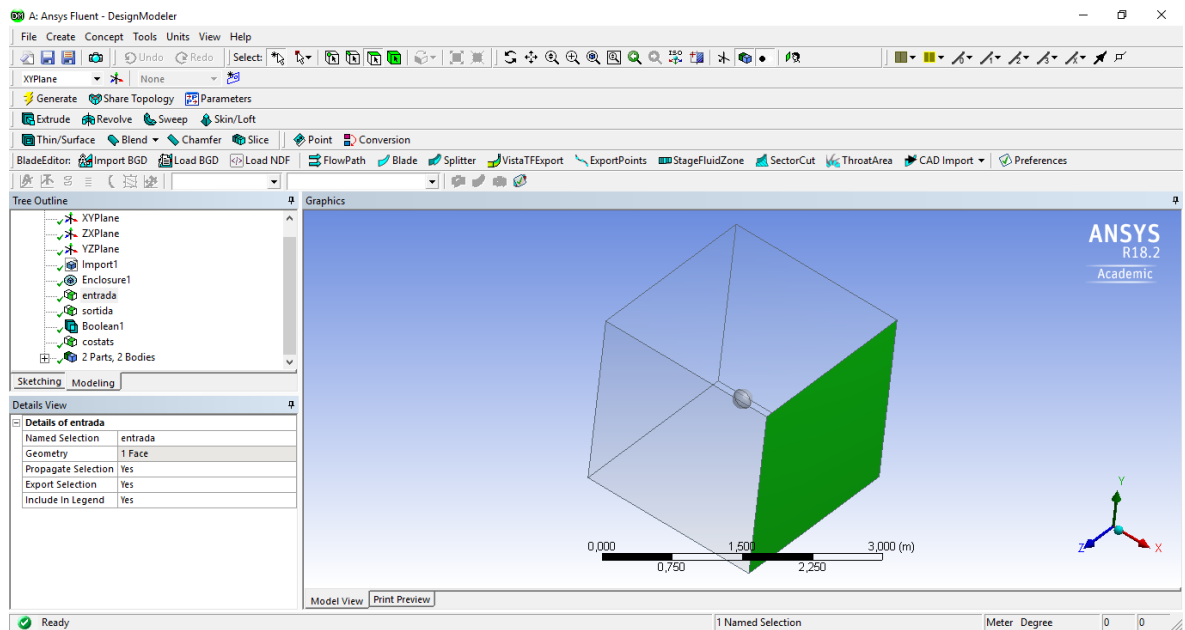
IL·LUSTRACIÓ 14. VISUALITZACIÓ DE LA PILOTA AL *DESIGN MODELER*

S'obrirà el Design Modeler i, una vegada allà, s'activarà l'opció "Enclosure", que permetrà que l'objecte estigui envoltat per una mena de caixa a l'interior de la qual estaran passant les condicions que se li indicaran posteriorment.



IL·LUSTRACIÓ 15. "ENCLOSURE"

Dins d'aquesta mateixa finestra i, amb l'objectiu d'aconseguir una visualització dels resultats més clara en futures passes, es donarà nom a totes les parts implicades en el procés.

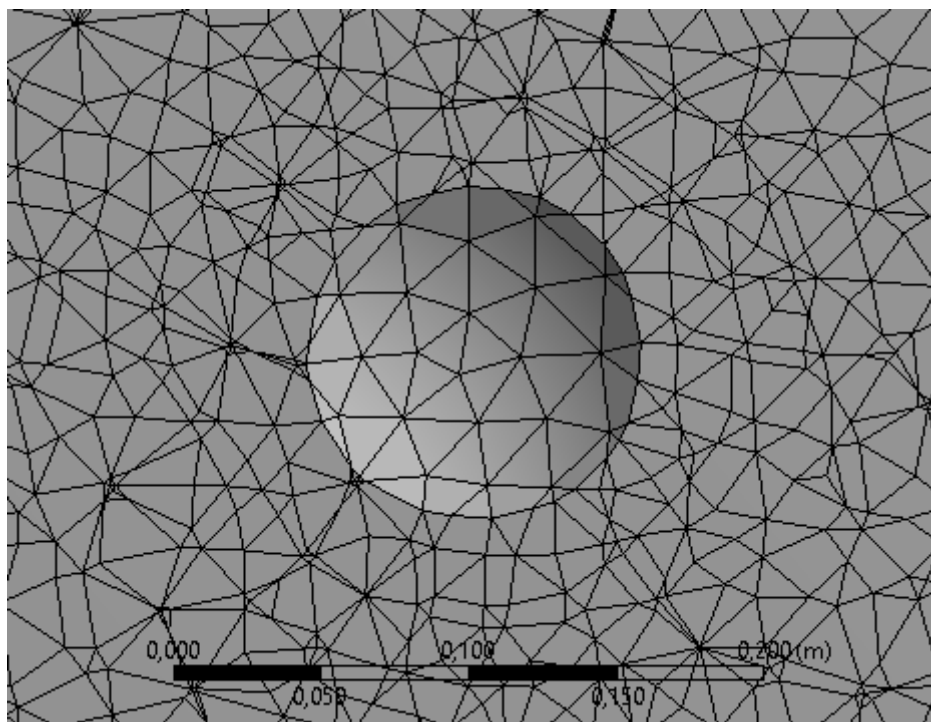


IL·LUSTRACIÓ 16. SUPERFÍCIES REFERENCIADAES

També caldrà crear un nou booleà per tal de restar el volum de l'esfera.

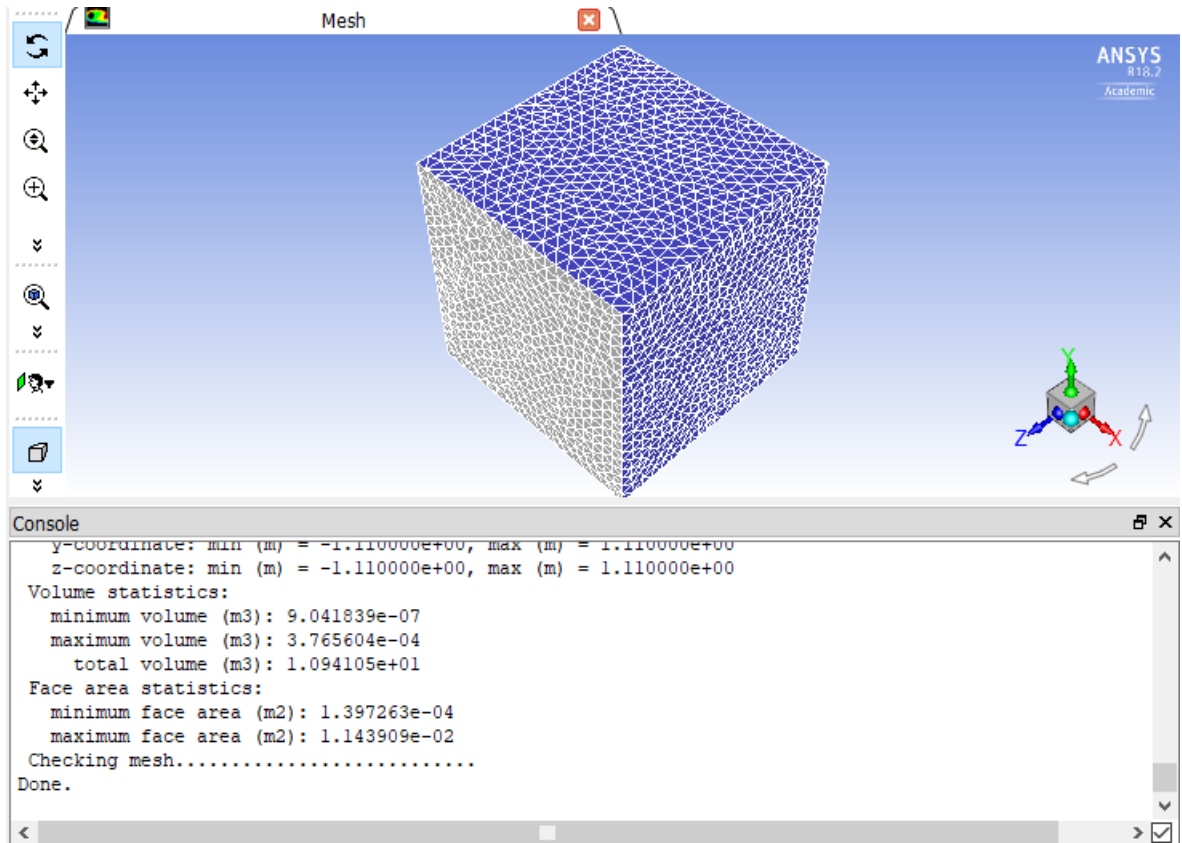
Després de tancar el programa per a crear el disseny de la geometria, l'objectiu serà crear el mallat:

S'ha canviat el Relevance Center a l'opció Fine, un nivell High d'Smoothing i, amb l'opció Assembly Meshing, hem indicat un mallat de tipus Tetrahedrons, la qual dota la malla d'una major qualitat. Per últim, hem ajustat el nivell de rellevància fins a 61, per tal de no superar el màxim nombre de nodes permès en aquesta versió (32.000). La malla resultant n'ha obtingut un total de 29.139.

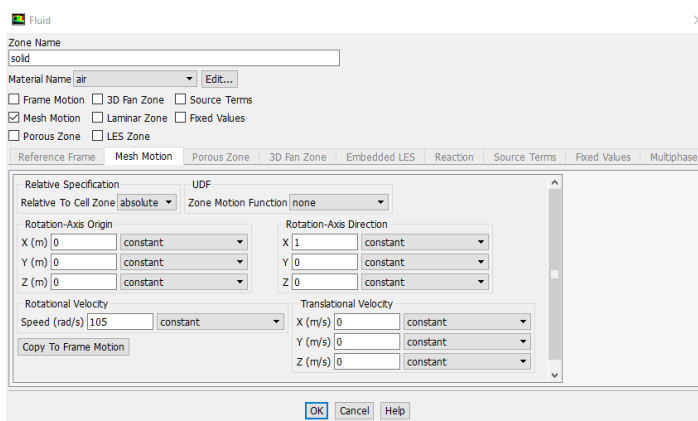


IL·LUSTRACIÓ 17. DETALL DE MALLAT

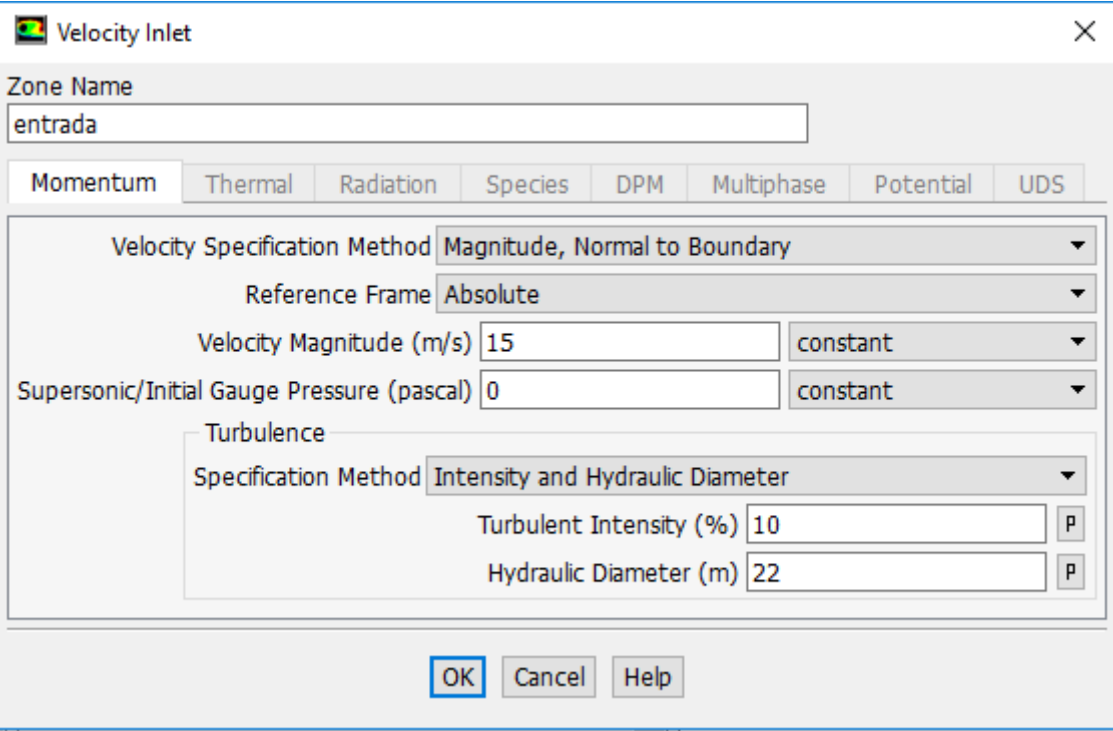
Acte seguit, serà el moment de crear el model de simulació. Es farà des de l'apartat Set Up. Quan es vulgui editar després d'haver tancat el programa, es realitzarà la comenda "Edit" del menú Solution. Es comprovarà el mallat, i se seleccionarà el tipus k-epsilon, emprat per totes les simulacions d'aquesta mena.

**IL·LUSTRACIÓ 18. PANTALLA SET UP**

Es defineix l'aire com a fluid amb el qual es treballarà. I se li indica una velocitat de rotació a l'esfera, en l'eix adient. Tot això serà indicat a l'apartat de Mesh Motion dins de Cell Zone Conditions.

**IL·LUSTRACIÓ 19. MESH MOTION**

És el moment de modificar les condicions de contorn (Boundary conditions). Allà és on hi serà aplicada una velocitat d'entrada d'aire d'uns 20 m/s, i una pressió de sortida de 0 atmosferes, simulant una pressió atmosfèrica. El Fluent demana, a més a més, una finestra de Specific Method. Després de seleccionar l'opció per introduir el tant per cent d'intensitat de turbulència i el diàmetre hidràulic s'ha omplert, respectivament, amb un 10% i 22m (tant en l'apartat de velocity inlet, on s'introdueix la velocitat, com en el de pressure outlet, per indicar la pressió).



Velocity Inlet

Zone Name: entrada

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 15 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

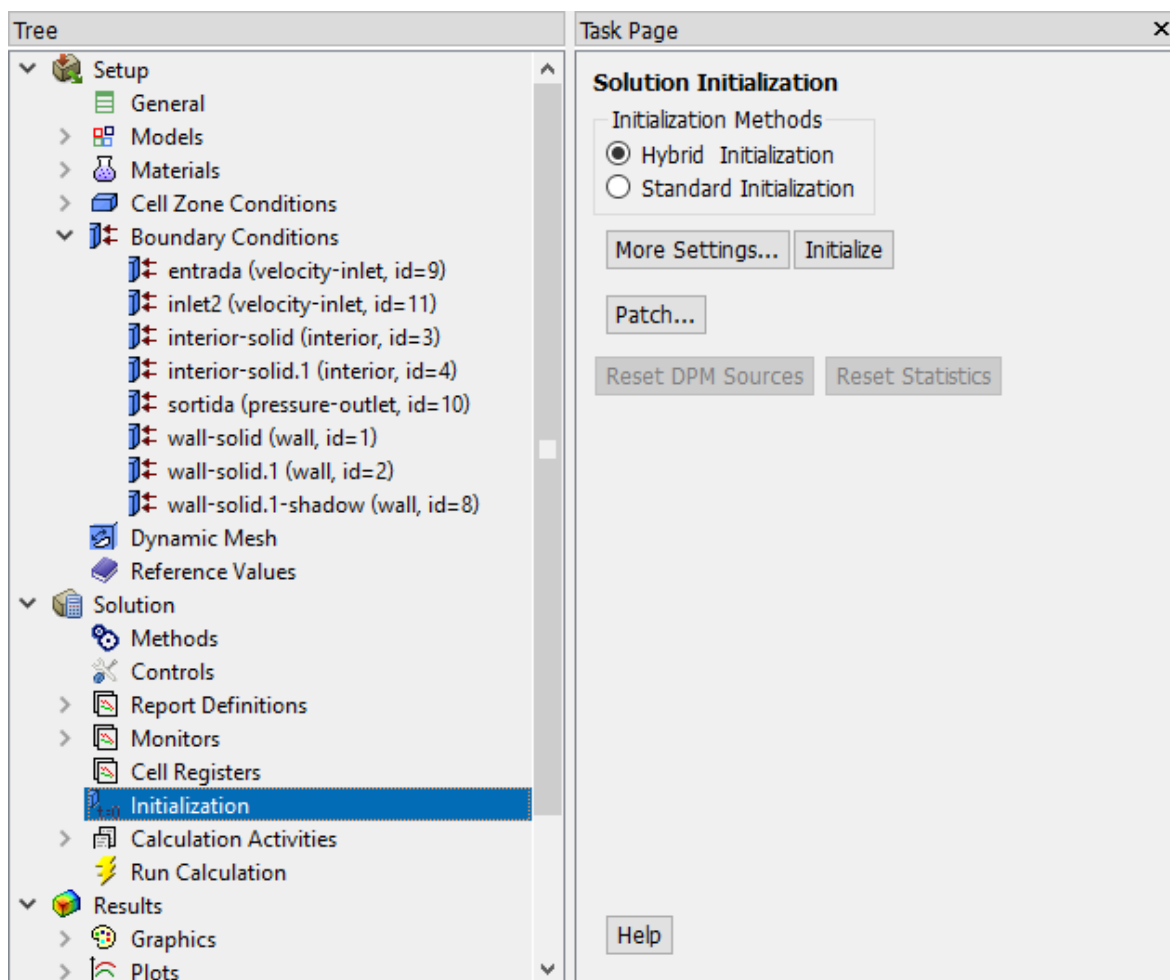
Turbulent Intensity (%): 10 P

Hydraulic Diameter (m): 22 P

OK Cancel Help

IL·LUSTRACIÓ 20. "BOUNDARY CONDITIONS"

En quant a la solució, primer es canvia l'estat d'inicialització. Amb una opció Hybrid Initialization, es prepararà el programa per a calcular els resultats. Ja es pot arribar al darrer pas abans de visualitzar els resultats: a l'apartat de Run Calculation. Es definirà el pas d'integració (time step size) com a 0.0001 segons i un nombre de 600 iteracions.

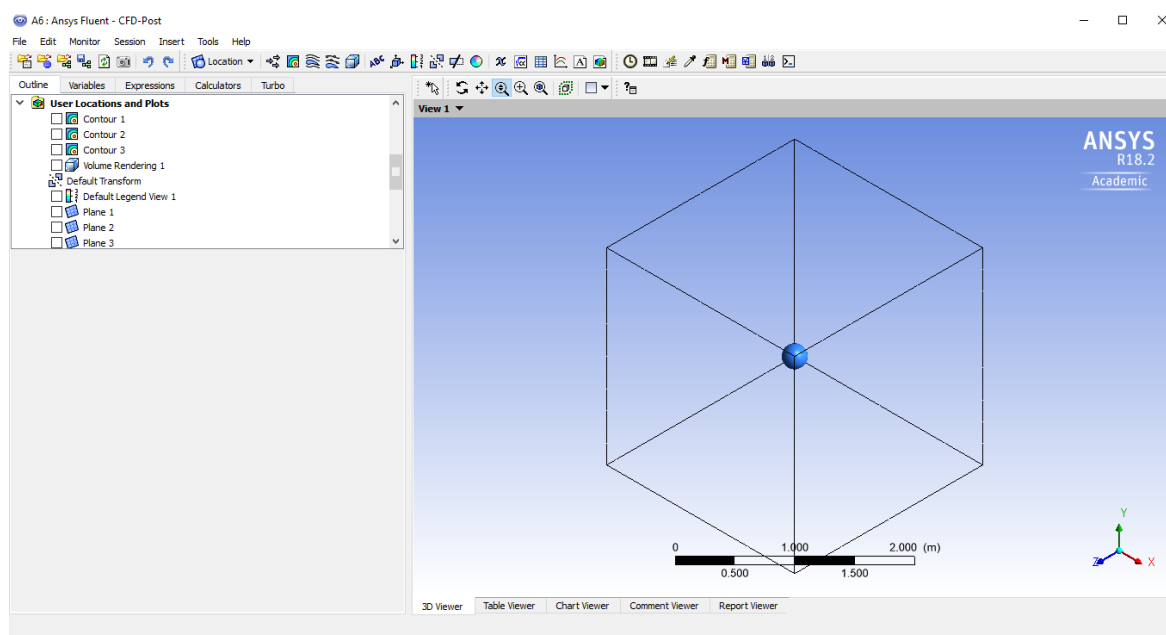


IL·LUSTRACIÓ 21. "INITIALIZATION"

5.2. Resultats

Una vegada s'ha explicat el procediment de posta en marxa del programa, és moment de realitzar les proves mitjançant el programa.

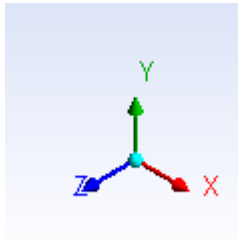
Es realitza el mateix procediment referit anteriorment al programa Fluent, i es visualitzen els resultats a l'apartat de Results.



IL·LUSTRACIÓ 22. "RESULTS"

S'han realitzat diferents simulacions. S'ha decidit variar els següents paràmetres: velocitat que porta la pilota quan és impactada, i rotació de la pilota. D'aquest darrer paràmetre també s'han observat diferents resultats, en funció de la seva velocitat angular, i en funció de quin és l'eix de gir.

A la imatge següent, es mostrarà l'orientació dels eixos. Durant totes les taules, es marca quin és l'eix al qual rota la pilota. Això correspondria amb l'efecte que se li dona. Si va precedit d'un signe +, rota en funció de l'eix positiu, el que apareix a la figura. Si, en canvi, és un signe -, ho fa en relació a l'altre, el que no apareix. El que seria anomenat com a sentit horari o antihorari, tot i que s'ha cregut que no era convenient emprar aquest terme degut a la diferència de posicions des del qual es pot veure l'objecte i, per tant, la diversitat d'opcions a l'hora de trobar una referència adequada.

**IL·LUSTRACIÓ 23. EIXOS**

Primer es realitzaran proves amb una velocitat de la pilota de **10m/s**. La velocitat de rotació serà de **20,94 rad/s**. S'ha creat la següent taula per tal de valorar els resultats, en funció del seu eix de gir:

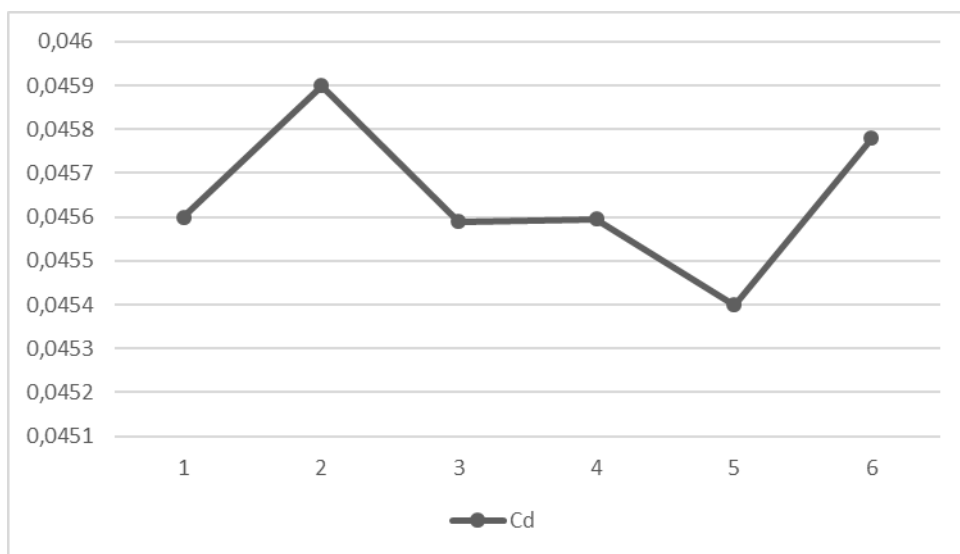
	F_d	F_L	C_d	C_L
+X	0,10617	-0,018642	0,0456	-0,008009
-X	0,10611	-0,01831	0,0459	-0,007867
+Y	0,106113	-0,018428	0,04559	-0,007917
-Y	0,106124	-0,0184527	0,045595	-0,0079281
+Z	0,105721	-0,0184522	0,0454	-0,007928
-Z	0,106568	-0,0184472	0,04578	-0,007926

TAULA 1.SIMULACIÓ 1

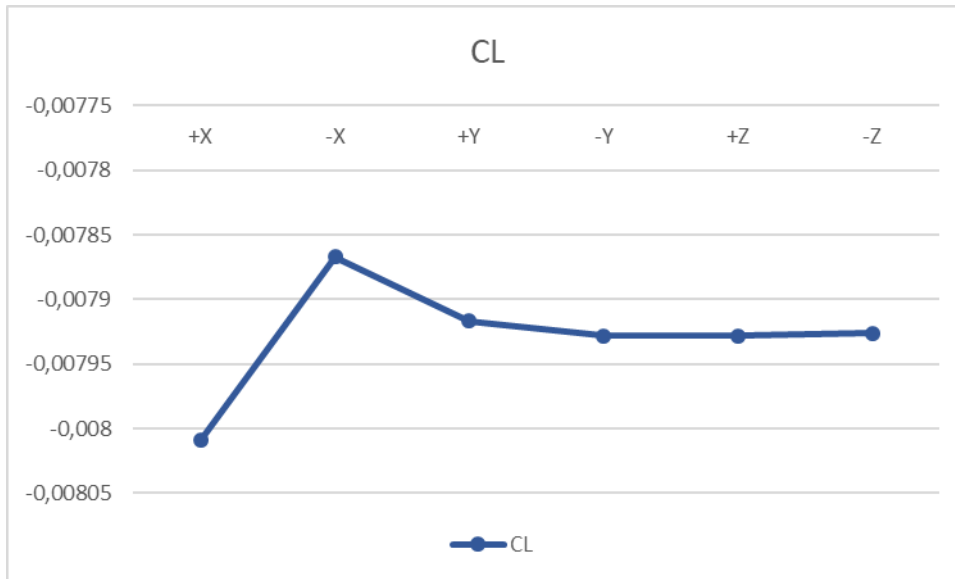
A continuació de cada taula, es mostraran els resultats en un gràfic, amb l'objectiu d'esclarir i organitzar millor la informació.

Caldrà atendre a les següents consideracions:

- El primer punt correspondrà a la fila de +X, el segon -X, i el tercer a +Y o -Y, i així successivament.
- Degut a la importància dels decimals a l'hora de la visualització, s'ha representat en dues gràfiques diferents, per tal de tenir més precisió: la primera correspondrà al C_d i la segona al C_L .



IL·LUSTRACIÓ 24. 1A SIMULACIÓ, C_d

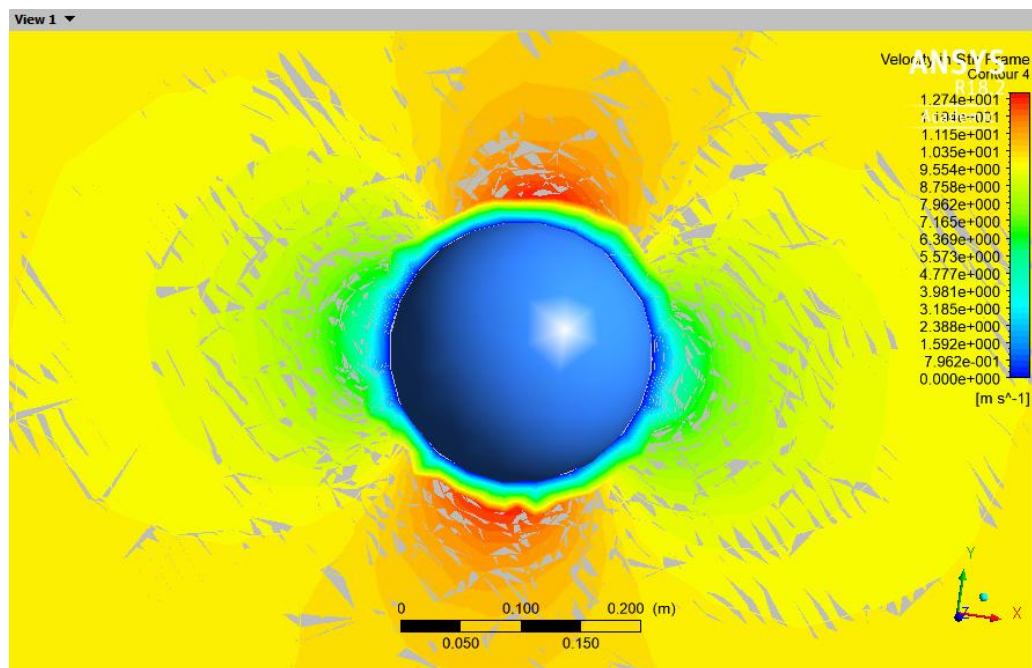


IL·LUSTRACIÓ 25. 1A SIMULACIÓ, C_L

Per tal d'enfocar els casos extrems, es realitzaran proves amb visualitzacions de resultats mitjançant Countours i Streamlines. S'ajustarà l'escala mitjançant la comanda “# of contours” per tal de veure els resultats amb major exactitud. Al costat de la figura s'obté la llegenda que indica quina velocitat correspon a cada punt del dibuix.

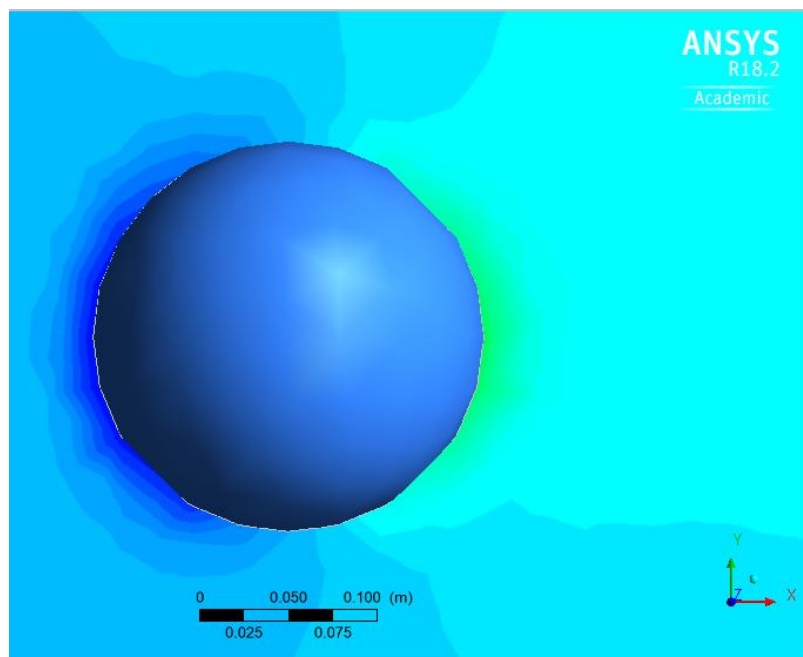
En aquesta primera simulació s'estudien els casos +X (mínim C_L), +Z (mínim C_d) i -X (màxim dels dos coeficients), s'extreuen els següents resultats:

En al primer cas, s'obté una velocitat màxima de 12,74 m/s



IL·LUSTRACIÓ 26. VELOCITAT SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE +X)

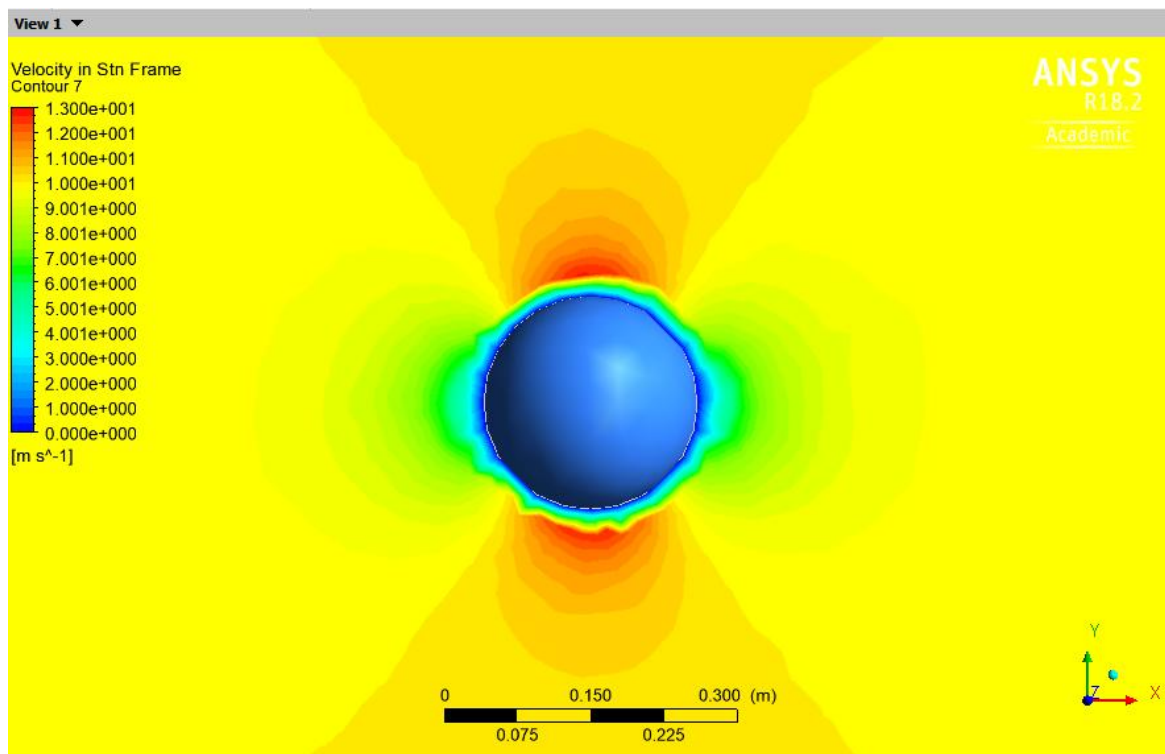
S'arriba a una depressió d'uns -55,99 Pa



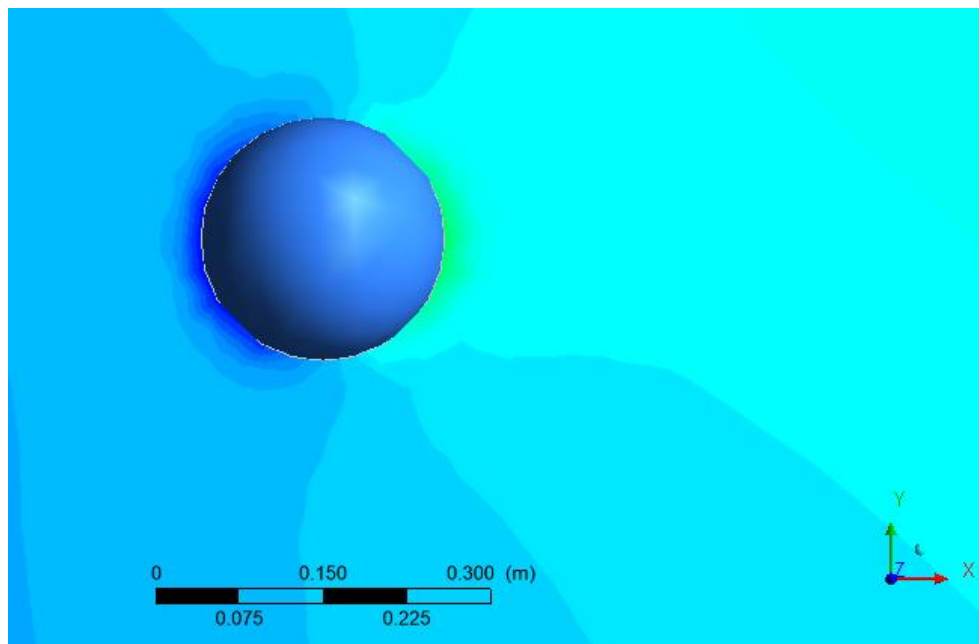
IL·LUSTRACIÓ 27. PRESSIÓ SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE +X)

En quant al cas d'una rotació al voltant de l'eix +X, s'obté una velocitat de 13 m/s i una

depressió de -56,17 Pa

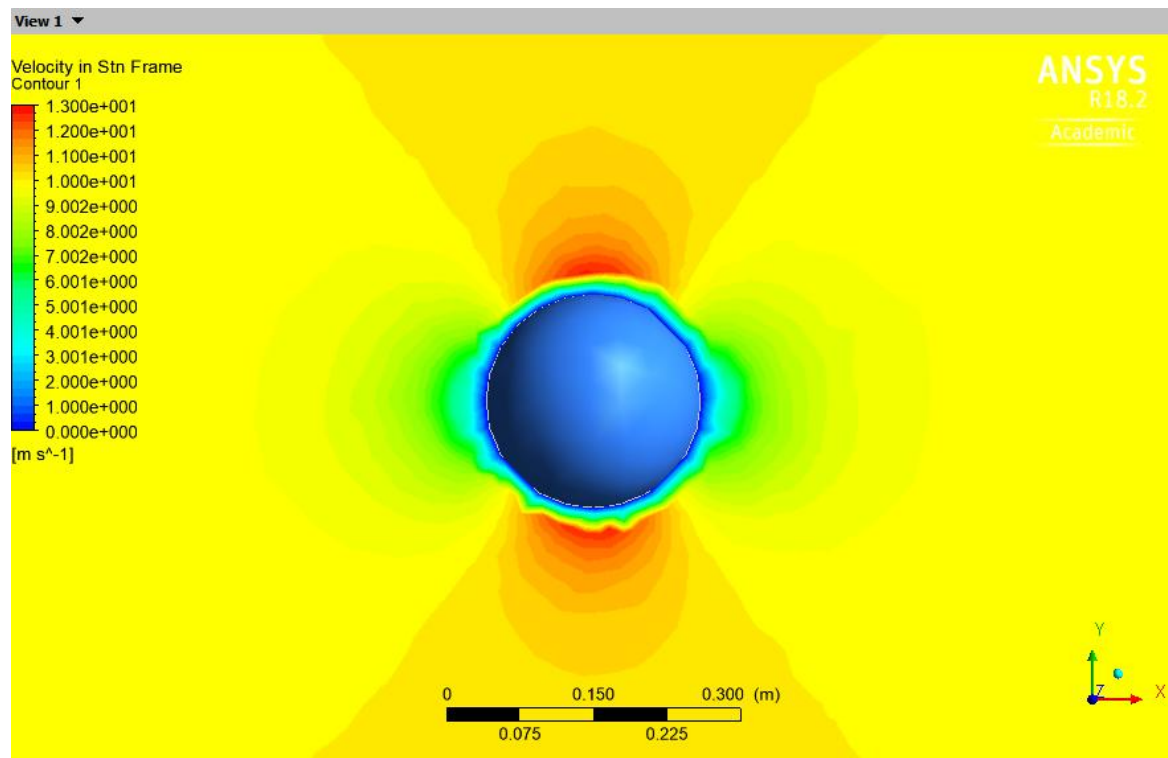


IL·LUSTRACIÓ 28. VELOCITAT SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE -X)

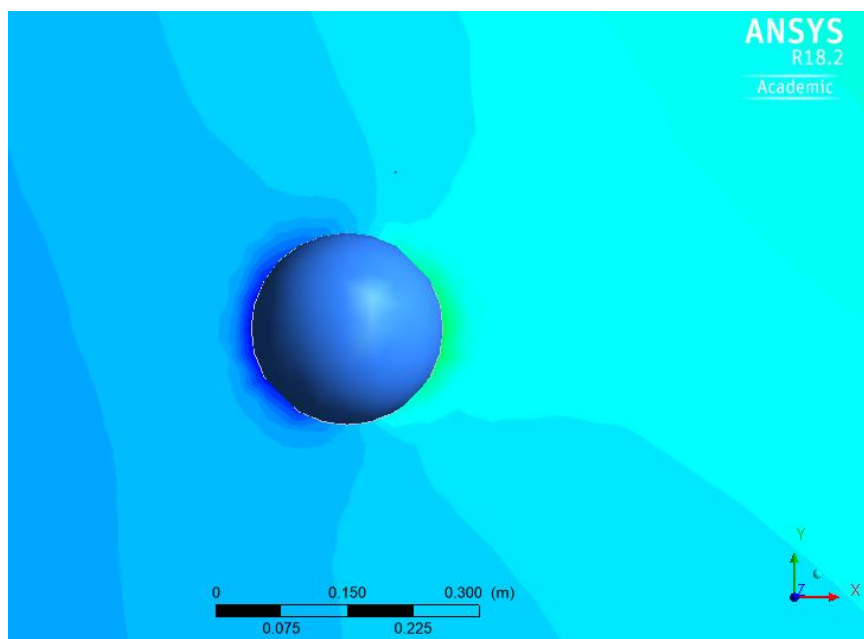


IL·LUSTRACIÓ 29. PRESSIÓ SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE -X)

En el darrer cas, la velocitat màxima i la pressió mínima són, respectivament, 13 m/s i - 54,59 Pa



IL·LUSTRACIÓ 30. VELOCITAT SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE +Z)

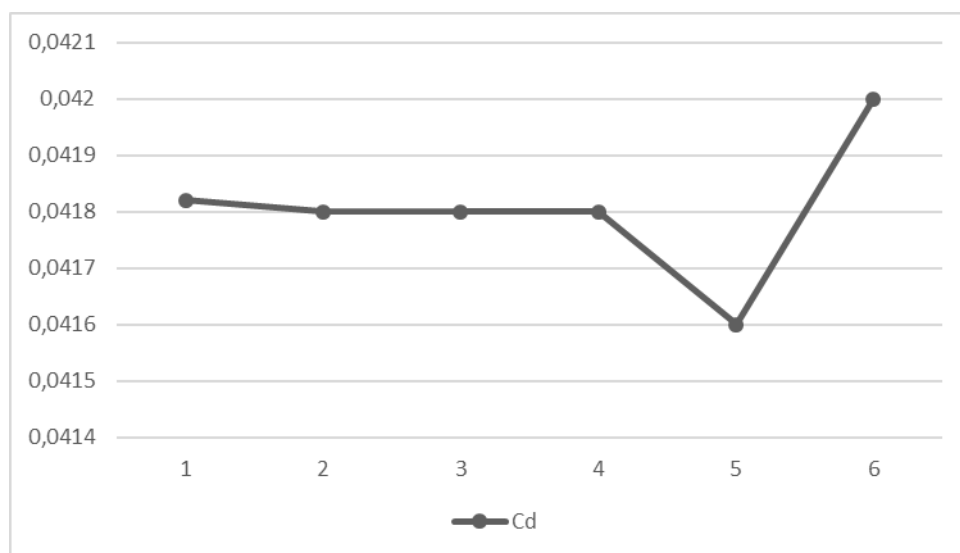


IL·LUSTRACIÓ 31. PRESSIÓ SIMULACIÓ 1 (AL VOLTANT DE +Z)

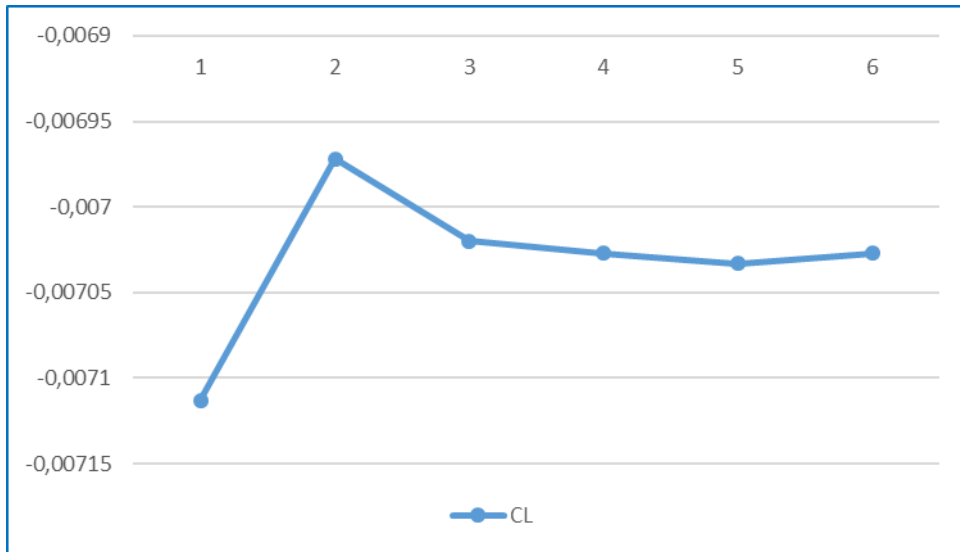
Properament, els resultats corresponen a una prova amb una velocitat de **15 m/s**. La velocitat de rotació segueix sent de **20,94 rad/s**.

	F_d	F_L	C_d	C_L
+X	0,219012	-0,03725	0,04182	-0,007113
-X	0,218912	-0,0365114	0,0418	-0,006972
+Y	0,21891	-0,03676	0,0418	-0,00702
-Y	0,2189	-0,0368	0,0418	-0,007027
+Z	0,2181	-0,03683	0,0416	-0,007033
-Z	0,2199	-0,0368	0,042	-0,007027

TAULA 2. SIMULACIÓ 2



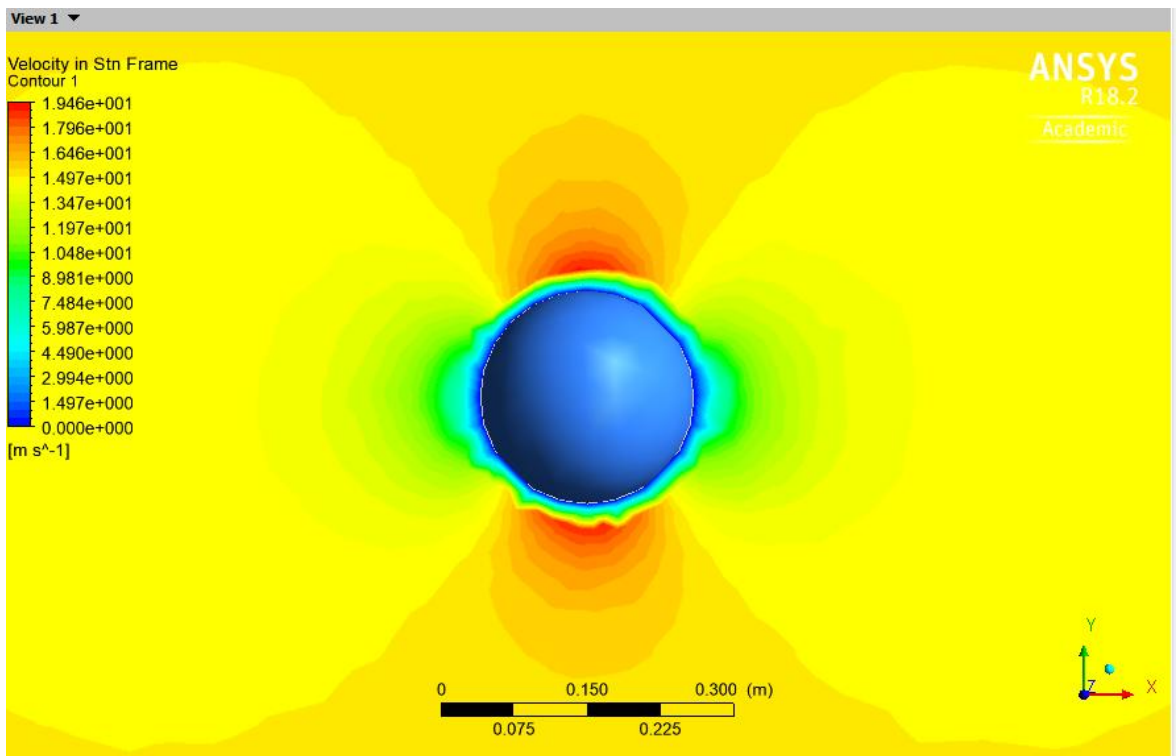
IL·LUSTRACIÓ 32. 2A SIMULACIÓ, C_d



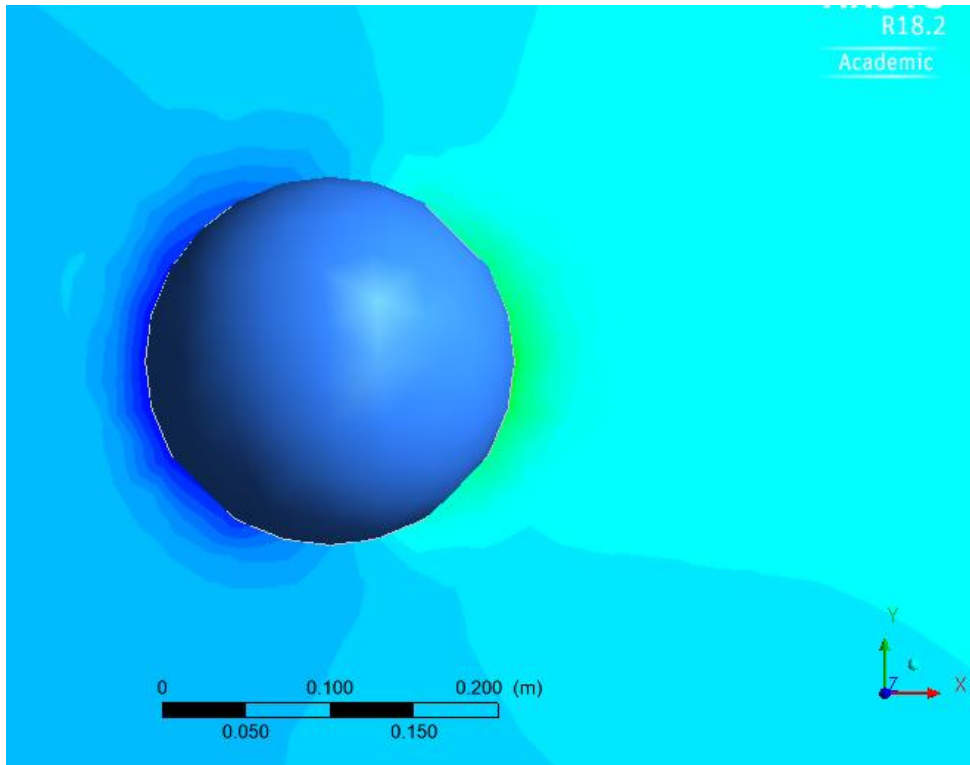
IL·LUSTRACIÓ 33. 2A SIMULACIÓ, CL

Casos extrems d'aquesta simulació: +X i -X, +Z i -Z

En el primer que s'observarà, amb rotació sobre l'eix Z positiu, s'arriba a una velocitat màxima de 19,455 m/s. En quant a la pressió, el punt mínim correspon a -118,046 Pa



IL·LUSTRACIÓ 34. VELOCITAT SIMULACIÓ 2 (AL VOLTANT DE +Z)



IL·LUSTRACIÓ 35. PRESSIÓ SIMULACIÓ 2 (AL VOLTANT DE +Z)

Per a una Z negativa, els resultats són de -122,16 Pa i 19,459 m/s

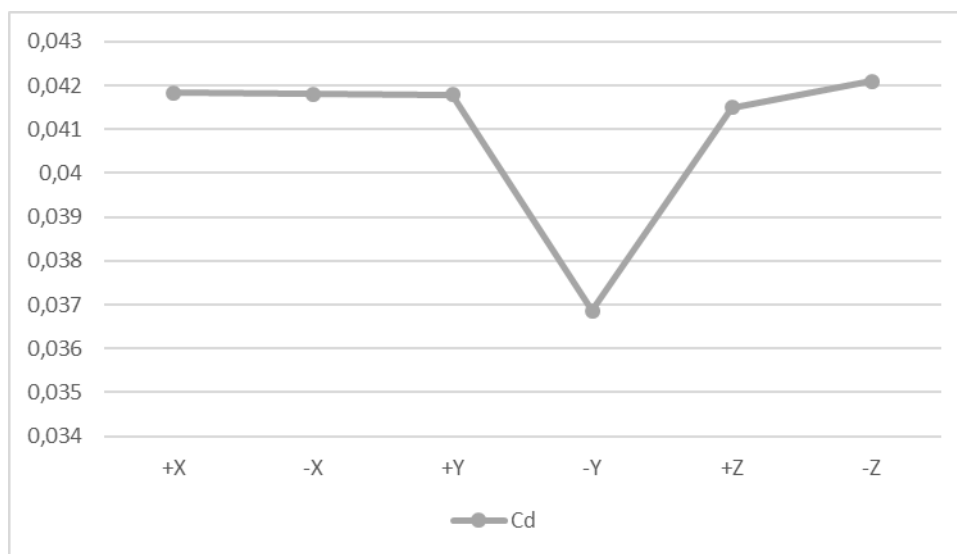
A partir d'ara, i atenent a la situació de que ja s'han mostrat imatges amb anterioritat, i la relació d'igualtat que hi ha entre elles, només es mostraran els resultats numèrics i, la imatge d'algun d'ells en el cas que fos un valor significatiu.

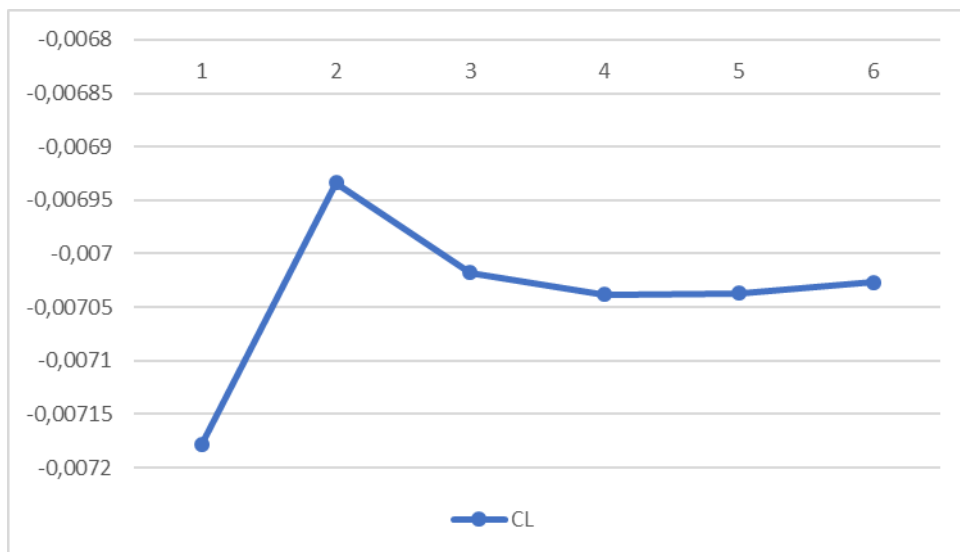
En el cas de la rotació al voltant de l'eix X tenim les següents dades:

- + X: 19,46 m/s i -120,24 Pa
- -X: 19,456 m/s i -120,39 Pa

Més tard s'ha procedit a variar la velocitat de gir, marcada en revolucions per minut. S'augmenta de 20,94 a **36,65 rad/s**, el que correspondria a dotar la pilota d'un gran efecte. Per a aquesta primera simulació, s'ha mantingut el nivell anterior de **15m/s**.

	F_d	F_L	C_d	C_L
+X	0,219068	-0,037594	0,04183	-0,0071788
-X	0,218903	-0,036311	0,0418	-0,006934
+Y	0,218857	-0,03675	0,04179	-0,0070176
-Y	0,21892	0,0418	0,03686	-0,007038
+Z	0,217405	-0,03685	0,0415	-0,007037
-Z	0,220523	-0,0368	0,0421	-0,007027

TAULA 3. SIMULACIÓ 3**IL·LUSTRACIÓ 36. 2A SIMULACIÓ, C_D**



IL·LUSTRACIÓ 37. 3A SIMULACIÓ, CL

S'analitzaran els casos -X, +X i -Y

Els resultats es mostraran a la següent taula:

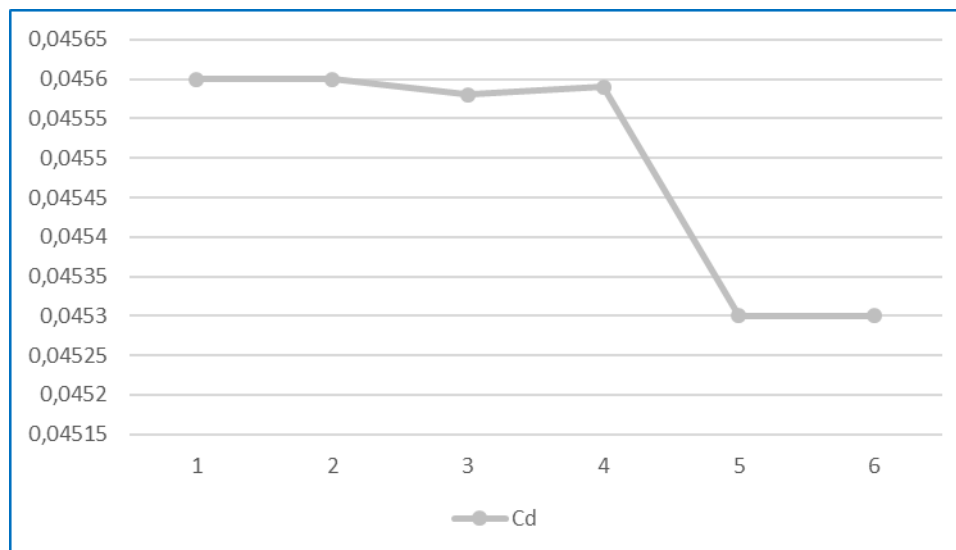
	Velocitat màxima	Depressió màxima
+X	19,461	-120,123
-X	19,456	-120,377
-Y	19,458	-120,08

TAULA 4. CASOS EXTREMS SIMULACIÓ 3

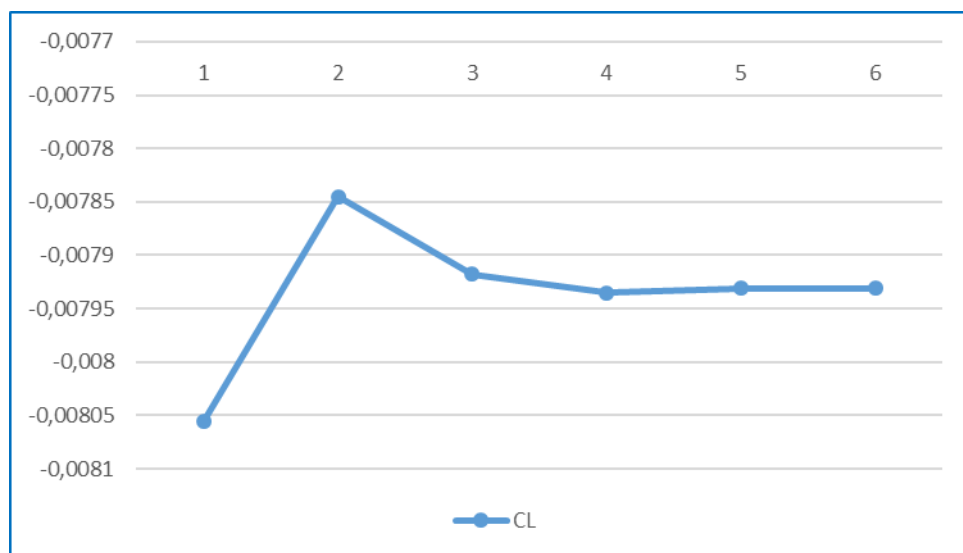
Per últim, s'ha decidit calcular què passaria si la velocitat fos de **10m/s** i la velocitat angular de **31,42 rad/s**, amb les següents conseqüències:

	F_d	F_L	C_d	C_L
+X	0,106188	-0,01875	0,0456	-0,008056
-X	0,10609	-0,01826	0,0456	-0,007845
+Y	0,106098	-0,01843	0,04558	-0,007918
-Y	0,10613	-0,01847	0,04559	-0,007935
+Z	0,1055	-0,01846	0,0453	-0,007931
-Z	0,1055	-0,01846	0,0453	-0,007931

TAULA 5. SIMULACIÓ 4



IL·LUSTRACIÓ 38. 2A SIMULACIÓ, C_d



IL·LUSTRACIÓ 39. 4A SIMULACIÓ, CL

S'estudiaran els mateixos casos que a la simulació anterior:

	Velocitat màxima	Depressió màxima
+X	13,0045	-55,828
-X	13,0016	-56,081
-Y	13,0028	-56,285

TAULA 6. CASOS EXTREMS SIMULACIÓ 4

6. Conclusions

Primerament l'objectiu serà buscar un patró comú, dintre d'aquests tres paràmetres anteriorment esmentats.

Pel que fa al C_d , es pot observar que sempre hi ha un decreixement del seu valor quan s'escull una simulació al voltant del seu eix Z positiu. Seria un colpeig en el qual no se li pot aplicar gaire força, i no és dels més habituals.

Es veu que, com era d'esperar, els valors més alts de C_d s'aconsegueixen quan la velocitat és menor. Quan s'aplica una velocitat de 15m/s, sent la velocitat de gir de 36,65 rad/s, és el moment en què s'assoleix un coeficient de "drag" més baix.

Si es fixa l'atenció en el C_L , també es pot fer alguna consideració. Segueix un patró comú en tots els casos, i és que el seu valor és significativament més baix quan es tracta d'una rotació al voltant de l'eix X positiu. Si s'extrapola al futbol, aquesta rotació seria la corresponent al que s'anomenaria un xut amb "rosca", sempre parlant de jugadors dretans (el més habitual).

De la mateixa manera que abans es nota que, en valor absolut, el màxim es troba quan la velocitat és més baixa. També és destacable que, l'interval en el qual es mou el valor d'aquest coeficient "lift", no varia gaire en funció de la seva velocitat de rotació, tot i que una sigui gairebé el doble de l'altra.

Ajuntant tot plegat, les simulacions que tenen relacions C_d - C_L més baixes són les de 15m/s i 36,65 rad/s.

En quant a l'estudi de les velocitats i pressions extremes, s'arriba a descobrir un mateix patró seguit per totes les simulacions. Es pot comprovar que, per a coeficients de drag elevats, la velocitat màxima obtinguda augmenta. També es veu que, pel que fa als casos extrems, a l'hora d'adquirir un coeficient de sustentació alt, es correspon a una major depressió.

És cert que un jugador de futbol no pensarà, quan estar a punt de fer un xut, de quina forma la mecànica de fluids el pot ajudar a aconseguir un millor resultat. Però, de la mateixa manera, sí que pot ser capaç d'entendre quins són els tipus de xuts que el poden afavorir.

És difícil que un futbolista aconseguixi un xut amb una rotació únicament al voltant d'un eix, però d'aquesta manera serà capaç de seleccionar quines característiques li interessin més en aquell moment.

Com bé s'explica al capítol 4.4 en relació a l'efecte Magnus, el gol més conegut científicament és un de Roberto Carlos , pel fet de recórrer una trajectòria "inexplicable". El propi jugador reconeixia fa poc que no és conscient de quin tipus de fenomen científic el va ajudar a aconseguir aquella fita.

És per això que, si algun futbolista vol fer ús dels resultats del treball, podrà veure's recompensat amb una millor tècnica i uns millors resultats a l'hora de posar-se les botes i sortir al camp.

Si és capaç de dotar la pilota d'una rotació amb la majoria de les seves components al voltant de l'eix Y positiu (sempre tenint en compte el sistema establert), sabrà que podrà minimitzar el coeficient de sustentació. Si prefereix un baix coeficient de resistència, buscarà un cop al voltant de l'eix Z+.

També podrà depenent del seu objectiu, decidir si prefereix donar a la pilota una major velocitat o si, en canvi, valora més positivament un augment de la seva velocitat angular. Si fa això últim, no variarà gaire el coeficient de sustentació.

Pel que fa a l'objectiu establert al començament, s'ha aconseguit combinar ciència i esport per arribar a un punt en comú on un pot ajudar l'altre. Mitjançant les simulacions amb el programa Ansys Fluent, i ajudat pel SolidWorks, s'han pogut extreure conclusions sobre quins tipus de situacions poden afavorir a l'esportista.

De la mateixa manera, el fet de realitzar proves físiques practicant amb una pilota de futbol, proporciona més detall i més idees a l'hora de treballar en els projectes científics relacionats amb qüestions similars.

Per últim seria destacable apuntar que, aquesta vegada s'ha realitzat un estudi consistent en un determinat esport, el futbol; tot i que, com ja s'ha comentat en anteriors punts, és totalment extrapolable i agradable de treballar en situacions similars relacionades amb altres esports. Hi ha tot un món per descobrir.

7. Anàlisi econòmic

7.1. Discretització del projecte

Dintre de l'anàlisi econòmic, s'han considerat els següents elements:

- Llicències de productes adquirits: SolidWorks, Ansys, paquet Office.
- Hores de treball, calculant un preu unitari de 20 €/hora
- Ordinador emprat per a fer el treball
- Preu dels crèdits del TFG
- Preus a descomptar

En primer lloc, es tractaran els valors de les llicències dels programes amb els quals s'ha de treballar. El preu de la de SolidWorks correspon a 135€, la d'Ansys augmenta fins a 6500€ i la del paquet Office 279€. Es té en compte que no seran utilitzades únicament per a realitzar aquest projecte. S'estima que un 50% de l'ús de les dues primeres serà dedicat a la realització del treball. En canvi, pel que fa al paquet Office, s'aproxima com un 20% de la utilització. A la següent taula s'estructuren els preus, aplicant-hi les proporcionalitats comentades:

	Preu (€)	Percentatge utilització (%)	Total (€)
Llicència SolidWorks	135	50	67,5
Llicència Ansys	6500	50	3250
Llicència Office	279	20	55,8

TAULA 7. LLICÈNCIES

Pel que fa a les hores de treball, més tard s'especificarà amb més detall la distribució de les mateixes. Aquí, però, es mostrarà un detall del preu total diferenciant les diferents parts en

què s'ha treballat.

	Temps (hores)	Preu (€/hora)	Total (€)
Cerca i estudi d'informació	70	20	1400
Redacció memòria	90	20	1800
Creació geometria	2	20	40
Simulacions	100	20	2000
Visualització resultats	50	20	1000
Detalls memòria	5	20	100

TAULA 8. TREBALL

Per parlar de l'ordinador amb el que s'ha realitzat el treball es realitzarà el mateix procediment emprat amb les llicències. S'ha adquirit un ordinador de 450€, gairebé exclusivament amb la finalitat de realitzar el treball. Tot i així, tenint en compte que podrà ser utilitzat amb posterioritat per altres motius, s'ha decidit entendre el ús del 50%, pel que sumará un total de 225€ al preu total.

Si es fa un cop d'ull als crèdits matriculats, apareixen un total de 14 crèdits. Entenent que el preu del crèdit és de 39,53, apareix un import de 474,36 per a la realització del treball de fi de grau.

Per últim, es realitzaran certs descomptes al total. Les llicències adquirides de SolidWorks i Ansys han estat proporcionades per la universitat, pel que es descomptaran els 67,5 i 3250 euros calculats anteriorment.

A l'hora de fer el càlcul total, es prenen els següents subtotals:

- Llicències de productes adquirits: SolidWorks, Ansys, paquet Office: 3373,3 €
- Hores de treball, calculant un preu unitari de 20 €/hora: 6340 €

- Ordinador emprat per a fer el treball: 225 €
- Preu dels crèdits del TFG: 474,36 €
- Preus a descomptar: 3317,5 €

Amb el que s'arriba al següent número:

3373,3 €
6340 €
225 €
474,36 €
-3317,5
TOTAL: 7095,16 €

TAULA 9. SUMA TOTAL

Afegint-hi un 15% de benefici industrial, s'arriba a un valor de 8159,43€.

Per últim, per tal d'aconseguir el preu amb IVA, se li suma el 21% i s'acaba considerant un cost total de 9872,91€.

7.2. Diagrama de Gantt

A continuació es mostrarà un diagrama de Gantt amb la representació amb més detall de l'apartat comentat anteriorment com a "hores de treball". Es detallaran les diferents parts a l'hora de la realització del projecte, i es distingirà en el temps l'espai dedicat a cadascuna d'elles.

Activitat	1-oct	7-oct	15-oct	7-nov	15-nov	15-des	20-des	5-gen	14-gen
Cerca i estudi d'informació									
Redacció memòria									
Creació geometria									
Simulacions									
Visualització resultats									
Detalls memòria									

TAULA 10. DIAGRAMA DE GANTT

8. Impacte mediambiental

Pel que fa a l'impacte mediambiental que envolta a aquest projecte, es podria considerar que és d'una importància baixa. El fet de la rotació de la pilota no implica cap tipus de perill de contaminació.

Si bé és cert que, tot el que envolta a un partit de futbol comporta un nivell alt de contaminació per motius que s'explicaran posteriorment, no afecta directament al punt de partida de la realització d'aquest projecte.

Començant per la realització dels camps o estadis de futbol, que en algun moment es van dur a terme, i van suposar emissions de gasos contaminants a l'atmosfera. Pel que fa al transcurs d'un partit, el mode de contaminació més clar és el que afecta al desplaçament dels aficionats a l'estadi. Sigui quin sigui el medi de transport, especialment en les emissions de CO₂ a l'atmosfera procedents dels cotxes.

També s'han de tenir en compte les emissions que surten de la cuina que inclouen la gran majoria d'instal·lacions. A més a més, totes les contaminacions acústica i lumínica relacionades amb el soroll i l'enllumenat que l'envolta.

En quant al projecte realitzat, les úniques fonts de contaminació han pogut estar les emeses per l'ordinador i per la llum utilitzada.

Pel que fa a les llums, el seu ús està relacionat amb les emissions contaminants de CO₂ pel simple fet de que a les centrals tèrmiques es produeix electricitat i des d'allà se n'emeten.

Els ordinadors també emeten gasos contaminants com el CO₂ cap a l'atmosfera. Cada hora que un ordinador està encès emet entre 52 i 235 grams equivalents del gas contaminant, considerant una potència entre 80 i 360 wats, segons la Comissió Europea. Tot i que també asseguren que un ordinador portàtil, com amb el que ha estat realitzat el projecte, consumeix entre un 50 i un 80 % que un de taula.

Tot i així, no són dades preocupants, ja que es considera que no s'emeten prou gasos contaminants a l'atmosfera. S'estima que el treball que s'ha fet per dia, si es sumés tot el que correspondria a un any sencer, equivaldria a un recorregut de 1000 km en cotxe.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Efecto Magnus, *Física, fluidos, dinámica*.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/magnus/magnus.htm>

- [2] Deporte total, *El Comercio*.
<https://elcomercio.pe/deporte-total/futbol-mundial/gol-imposible-roberto-carlos-francia-cumple-20-anos-video-428368>

- [3] El efecto Magnus: cambiando las trayectorias, *Factoría de ingenieros*
<https://www.factoriadeingenieros.com/efecto-magnus/>

- [4] Vortex, un molino de viento sin palas, *Technology review*
<https://www.technologyreview.es/s/4658/vortex-un-molino-de-viento-sin-palas>

- [5] Fluidos en movimiento, *Física II*
http://fcm.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/FLUJOS.htm

- [6] Flujos bidimensionales. *Concepto de función de corriente*
<http://www2.uned.es/ing-fluidos/IntroMF/node54.html>

- [7] Flujo potencial, *Área de mecánica de fluidos*
<http://www.cps.unizar.es/~jblasco/AFT-P4.pdf>

- [8] Flujo potencial, *Facultad de ingeniería de Buenos Aires*
<http://materias.fi.uba.ar/6718/Flupot.pdf>

- [9] Los ordenadores también emiten CO2, *Planeta recicla*
<https://www.ecoembes.com/es/planeta-recicla/blog/los-ordenadores-tambien-emiten->

[co2](#)

[10] Mecánica de fluidos, *Frank M. White*

[11] Flujo potencial bidimensional, *Aldo Tamburrino Tavantzis*

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/2/CI3101/1/material_docente/bajar?id_material=672007

[12] Capa límite y flujo externo compresible

<http://kimerius.com/app/download/5784121617/Capa+l%C3%ADmite+y+flujo+externo+compresible.pdf>

Bibliografia complementària

[1] <https://www.youtube.com/watch?v=oYfXl2Vrw8g>

[2] <https://www.youtube.com/watch?v=BSTeuPWzJOY>

[3] <https://www.youtube.com/watch?v=2OSrvzNW9FE>